

Die 18. Tagung der Internationalen Hochspannungskonferenz

Allgemeiner Verlauf der Tagung

(Von Christian Kneller, Stuttgart, und Paul Jacottet, Frankfurt a. M. *) DK 061.3(44)„1960“ : 621.31.027.3

Im üblichen zweijährlichen Turnus fand vom 15. bis 25. Juni 1960 in Paris, in den Räumen der Fondation Berthelot, Rue Saint-Dominique, wiederum eine Tagung der Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE) statt, die 18. Zusammenkunft seit ihrer Gründung im Jahre 1921. Die Tagung wurde am 15. Juni mit Begrüßungsansprachen des französischen Ministers für Industrie, Jeanneney, und des Präsidenten der CIGRE, G. Silva, feierlich eröffnet. Dankesworte sprachen J. Møllerhøj (Dänemark) für die Kongreßteilnehmer des englischen Sprachgebietes und M. Vidmar (Jugoslawien) für die des französischen Sprachgebietes. Ein eindrucksvoller Lichtbildervortrag über die Entwicklung des französischen Verbundnetzes im Zusammenhang mit den Fortschritten der Energieerzeugung, gehalten von P. Ailleret, dem Vorsitzenden des Französischen Nationalkomitees, beschloß die festliche Eröffnungssitzung.

Etwa 1900 erste Fachleute aus 43 Ländern der Welt, die den Kreisen der Elektrizitätsversorgung, Elektroindustrie, Behörden, Technischen Hochschulen sowie der beamteten und beratenden Ingenieure angehören, begleitet von etwa 500 Damen, haben an der diesjährigen Tagung der CIGRE teilgenommen. Zwölf namhafte internationale Organisationen hatten Delegierte entsandt. Die deutsche Elektrotechnik war mit 125 Sachverständigen aus West-, Mitteldeutschland und Berlin vertreten. Diese große Teilnehmerzahl sowie die immer noch wachsende Zahl der ständigen Mitglieder der CIGRE, die heute etwa 2500, verteilt auf 50 Länder, beträgt, zeugt von der beachtlichen Bedeutung, welche die Fachkreise den auf den Tagungen und in den Veröffentlichungen der CIGRE behandelten Fragen beimessen.

In beiden Vortragssälen der Fondation Berthelot fanden vom 16. bis 24. Juni Sitzungen folgender Fachgruppen statt, und zwar in allgemeinen Parallelsitzungen für zwei Fachgebiete je Tag: Generatoren, Transformatoren, Schaltgeräte, Hochspannungskabel, Maste und Mastgründungen, Freileitungen (Leitungsschwingungen), Isolatoren, Schutzeinrichtungen und Relais, Planung, Betrieb und Stabilität der Netze, Überspannungen und Blitzeinwirkungen, Drehstrom-Energieübertragung mit Höchstspannungen, Gleichstrom-Energieübertragung mit Höchstspannungen. Für die Fachgruppen feste und flüssige Isolierstoffe, Schaltanlagen, Kondensatoren, Nachrichtenübertragung in Hochspannungsnetzen, Beeinflussungstechnik, Isolationskoordination waren — mit Ausnahme von einigen von den betreffenden Studienkomitees eingereichten Berichten über den Fortgang der Arbeiten — keine Fachberichte vorgelegt worden. Diskussionsitzungen für diese Fachgebiete finden nur im vierjährigen Zyklus, also das nächste Mal im Jahre 1962, in Paris statt.

*) Direktor Dipl.-Ing. Chr. Kneller ist Vorsitzender und Dr.-Ing. P. Jacottet Schriftführer des Deutschen Komitees der Internationalen Hochspannungskonferenz.

Insgesamt etwa 135 Fachberichte aus 25 Ländern, jeweils in englischer und französischer Sprache gedruckt, lagen der Tagung vor. Deutschland war hieran mit 8 Berichten beteiligt und hatte außerdem 10 Beiträge, teils im Namen verschiedener Studienkomitees, teils als Teilberichte dieser Studienkomitees eingereicht. Für die jeweils von einem bekannten Fachmann geleiteten Sitzungen jeder Fachgruppe hatte je ein Gruppenbericht aus den in das betreffende Gebiet fallenden Fachberichten die wichtigsten Ergebnisse zusammengefaßt und daraus ein Diskussionsprogramm entwickelt. Diesen Gruppenberichten schlossen sich ausgiebige Diskussionen an, zu denen auch deutsche Fachleute wesentlich beigetragen haben. Die der Aussprache über die einzelnen Fachgebiete gewidmeten Sitzungen waren stark besucht; Bild 1 zeigt eine Gruppe deutscher Teilnehmer an einer dieser Sitzungen. Sämtliche Fachberichte und Diskussionsbeiträge werden, wie auch nach früheren Tagungen üblich, in einem dreibändigen Berichtswerk über die CIGRE-Tagung 1960 Ende dieses Jahres erscheinen, von dem eine Ausgabe in englischer, die andere in französischer Sprache erhältlich ist.

Die Diskussionen wurden in einer der beiden Kongresssprachen, nämlich in Englisch oder in Französisch geführt. Von den eine dieser beiden Sprachen nicht ausreichend beherrschenden Tagungsteilnehmern wurde es sehr begrüßt, daß wieder — wie vor zwei Jahren — die Diskussionsbeiträge simultan in die jeweils andere Konferenzsprache und außerdem ins Deutsche übersetzt wurden. So konnten also die Diskussionsbeiträge nach Wahl in einer dieser drei Sprachen mit Kopfhörern abgehört werden. Von dem Abhören in deutscher Sprache haben nicht nur Fachleute aus Deutschland Gebrauch gemacht. Die auch bei anderen internationalen Konferenzen übliche Simultanübersetzung hat den großen Vorteil der Zeitersparnis; nur mit diesem Verfahren konnte, selbst bei der begrenzten Redezeit, die große Zahl der Diskussionsbeiträge auf dieser Tagung überhaupt bewältigt werden. Das Ergebnis der Simultanübersetzung war im allgemeinen befriedigend, wenn auch kleine Mängel, teils bei der Anlage selbst, z. B. „Übersprechen“, teils bei der Übersetzung, z. B. gelegentlich nicht fachgerechte Übertragung, in Kauf genommen werden mußten. Hierbei darf allerdings nicht verkannt werden, welche ungeheuren Anforderungen die simultane Übersetzung technisch schwieriger Texte selbst an den befähigsten Dolmetscher stellt. Nur in den seltensten Fällen beherrscht er das Fachgebiet, er sieht sich weiter oft der großen Schwierigkeit gegenüber, wenig verständliche und zu schnell gesprochene Diskussionsbeiträge im richtigen Sinn wiederzugeben. Das Deutsche Komitee wird es sich angelegen sein lassen, auf Grund der bei dieser Tagung gewonnenen Erfahrungen in enger Zusammenarbeit zwischen Konferenzleitung und Dolmetschern an einer weiteren Verbesserung der simultanen Übersetzung



Bild 1. Gruppe deutscher Teilnehmer an einer Fachsitzung.

und ihrer Organisation bei künftigen Tagungen mitzuwirken.

Während der Tagung fanden auch eine Sitzung des Verwaltungsrates und eine Generalversammlung der Konferenzmitglieder statt. Der Verwaltungsrat setzte ein neues Studienkomitee 19 „Einfluß des Wechselstrom-Bahnbetriebes auf Energieversorgungsnetze“ ein und wählte *D'Arbela* (Italien) zu dessen Vorsitzenden. Für ausscheidende Vorsitzende einiger Studienkomitees wurden Nachfolger bestimmt. Mit Bedauern wurde zur Kenntnis genommen, daß Dr. Roser (Deutschland) den Vorsitz des Studienkomitees 18 „Kondensatoren“, dessen Arbeiten er durch seine Verhandlungsführung und Initiative außerordentlich gefördert hatte, wegen Übernahme neuer Aufgaben niederlegen mußte; zu seinem Nachfolger wurde Dr. *Lehmhaus* (Deutschland) gewählt. Kurz vor der Tagung hatte der Tod eines der ältesten Mitglieder und treuesten Freunde der CIGRE, den verdienstvollen Professor *A. Barbagelata*, den Vorsitzenden des Italienischen Nationalkomitees, abgerufen. Dieses wird künftig durch Professor *Someda* geleitet werden.

Die meisten der 18 Studienkomitees der CIGRE hielten während der Tagung Sitzungen ab. Die Beratungen im kleinen Kreis ausgewählter Fachleute dienten der vertieften Behandlung der in den Fachgruppen erörterten Probleme und der Vorbereitung von Untersuchungen, die bis zur nächsten Tagung in den interessierten Ländern durchzuführen sind. Hierbei wurden auch verschiedentlich Vorarbeiten für spätere Empfehlungen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) geleistet. Die Studienkomitees 8 „Überspannungen und Blitzeinwirkungen“ und 15 „Isolationskoordination“ wurden von ihrem neuen Vorsitzenden, Professor Dr. *Baatz* (Deutschland), geleitet, der auch den Vorsitz in der Sitzung der Fachgruppe „Überspannungen und Blitzeinwirkungen“ führte. Das Studienkomitee 18 „Kondensatoren“ trat unter dem Vorsitz von Dr. *Lehmhaus* (Deutschland) ebenfalls zu einer Sitzung zusammen.

Auch in diesem Jahr war ein reichhaltiges Programm an technischen Besichtigungen vorgesehen. So konnten die Forschungsinstitute und Prüffelder der Electricité de France in Fontenay besichtigt werden. Das Höchstspannungslaboratorium enthält einen 50-Hz-Prüftransformator für 1 MV und 2 MVA, einen Stoßspannungsgenerator für 3,2 MV und 67 kJ und einen 100-kA-Stoßstromerzeuger für Ableiterprüfungen. An das 225-kV-Netz ist ein Hochleistungsprüffeld angeschlossen, in dem Schalter und Geräte im Spannungsbereich zwischen 5 und 400 kV auf Kurzschlußverhalten geprüft werden können, dabei sind je nach Spannungshöhe Kurzschlußleistungen zwischen 2 und 4,5 MVA (dreiphasig) möglich. Das Kabelprüffeld gestattet Prüfungen an Kabeln für Drehstromnetze mit Betriebsspannungen zwischen 5 und 400 kV, ferner an Gleichstromkabeln. Schließ-

lich sind Prüffelder für Freileitungen nebst Isolatoren und Armaturen sowie für statische Kondensatoren vorhanden.

Die Firma Le Matériel Electrique hatte zur Besichtigung ihres Werkes in Champagne-sur-Seine, nahe bei Fontainebleau, eingeladen. Das Werk stellt u. a. Turbogeneratoren und Wasserkraftgeneratoren bis 250 MW, Gleichstrom-Motoren und -Generatoren für metallurgische und Elektrolyse-Anlagen, Bahnmotoren, Quecksilberdampf-Gleichrichter (Ignitrons), z. B. für 50-Hz-Lokomotiven für 25 kV, her. Großem Interesse begegnete die Fertigungsstätte für die Isolierung (Verfahren „Thermalastik“) der Wicklungen von Hochleistungsturbogeneratoren, insbesondere mit Halbleitern, sowie die Serien-

herstellung von Silizium-Leistungsgleichrichtern, deren Anwendung auf elektrischen Lokomotiven und für die chemische Industrie sich immer mehr durchsetzt.

Schließlich galt ein Besuch zwei bemerkenswerten Anlagen der Electricité de France, und zwar dem 80 km südöstlich von Paris an der Seine gelegenen Dampfkraftwerk Montereau und der unweit hiervon befindlichen Freileitungsstation Le Chesnoy. Das Kraftwerk Montereau (Bild 2), das im vorigen Jahr in Betrieb genommen wurde, ist für eine Ausbauleistung von 1000 MW vorgesehen. In Betrieb sind zwei Blockeinheiten, bestehend aus je einem Dampfkessel und einem 125-MVA-Turbosatz; eine 250-MVA-Einheit ist in Bau. Die beiden Dampfkessel sind für eine Dampferzeugung von 360 t/h dauernd und von 400 t/h während 3 h bei Spitzenbelastung bemessen; sie können entweder mit Kohlenstaub oder mit Erdgas oder mit beiden gleichzeitig befeuert werden. Dampfdruck und Dampf Temperatur betragen 127 at und 540 °C am Eingang des Hochdruckteils der Turbine, 29 at und 540 °C nach der Zwischenüberhitzung. Die Leistung der wasserstoffgekühlten 125-MVA-Generatoren wird über Aluminiumschienen, die für jede Phase getrennt in koaxialen Rohren isoliert angeordnet sind, an die im Freien aufgestellten 15,5/230-kV-Drehstrom-Transformatoren abgegeben. Von dort wird die Energie an das 12 km westlich gelegene 380/225/63-kV-Schalt- und -Umspannwerk Le Chesnoy fortgeleitet. Es hat die Aufgabe, die Energie in das 225-kV-Verteilungsnetz einzuspeisen und außerdem über eine 63-kV-Verbindung die Hilfsbetriebe des Kraftwerkes Montereau zu versorgen. Der 63- und 225-kV-Teil, letzterer nach dem Prinzip der „gemischten Phasen“ installiert, beide mit hängend angeordneten ölarmen Leistungsschaltern ausgestattet, sind in Betrieb. Der 380-kV-Teil, der zum späteren Zusammenschluß des Pariser Gebietes mit den 380-kV-Übertragungsleitungen aus dem Südwesten und aus den Alpen vorgesehen ist, befindet sich in Bau.

Drei interessante Exkursionen schlossen sich an die Tagung an, die eine führte in das nordfranzösische Industriegebiet Lille-Jeumont und bot Gelegenheit zur Besichtigung der Anlagen und der neuesten Lokomotiven für den elektrischen Bahnbetrieb mit 50 Hz und 25 kV, ferner des 250-MW-Dampfkraftwerkes Anseruilles (im späteren Ausbau für 500 MW) sowie der Fabrikationsstätten der Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont. Die anderen beiden Reisen hatten das Mont-Blanc-Gebiet zum Ziel. Auf der einen konnten anschließend die Roselend-Staudämme und das demnächst in Betrieb kommende 500-MW-Kavernen-Wasserkraftwerk nahe Albertville im Tal der Isère, ferner das Kabelwerk Lyon, die Ateliers de Constructions Electriques de Delle sowie das gemeinsame Prüf- und Versuchsfeld der Delle-Alsthom besichtigt werden. Die andere Reise führte

vom Alpengebiet nach Grenoble mit einem Besuch der Firma Merlin et Gérin, weiter ins Durance-Tal, wo sich die der Energieerzeugung, der Bewässerung und dem Schutz des Tales gegen Überflutung dienenden Anlagen Serre-Ponçon mit dem unterirdischen 360-MW-Wasserkraftwerk befinden, und endete mit einer Besichtigung der Société Savoisienne de Construction de Transformateurs in Aix-les-Bains.

Neben den technischen Besichtigungen diente der Auflockerung der fachlichen Arbeit ein sorgsam zusammengestelltes Programm geselliger Veranstaltungen. Hier seien nur der traditionelle abendliche Empfang in den Räumen des Cercle Interallié und die hervorragende Ballettaufführung im Nationaltheater des Palais de Chaillot mit den Stars der Oper und dem Ballett der Komischen Oper erwähnt. Ein abwechslungsreiches Programm sorgte für die Unterhaltung der Delegierten begleitenden Damen. Ausflüge in die Umgebung von Paris, wie nach Versailles, Fontainebleau, Chantilly, Compiègne, Chartres, Rambouillet und weiter zu den Loire-Schlössern vermittelten unvergeßliche Eindrücke der Schönheiten des französischen Landes mit seinen bedeutsamen Kulturdenkmälern und Kunstschätzen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß auch der CIGRE-Tagung 1960 wiederum ein großer Erfolg beschieden war. Dank ihres hohen fachlichen Niveaus hat sie der Hochspannungstechnik und der elektrischen Energieübertragung einen beachtlichen Gewinn an wissenschaftlichen Erkenntnissen und eine wesentliche Bereicherung an praktischen Erfahrungen gebracht. Die Anknüpfung, Pflege und Vertiefung der fachlichen und persönlichen Beziehungen unter den Delegierten so vieler Länder der Welt über politische Grenzen und unterschiedliche Wirtschaftssysteme hinaus ist schließlich ein nicht zu unterschätzendes ideelles Ergebnis der Tagung.

Der Dank für den Erfolg der gelungenen Tagung gebührt ihrem aktiven, aufgeschlossenen Präsidenten G. Silva, ihrem

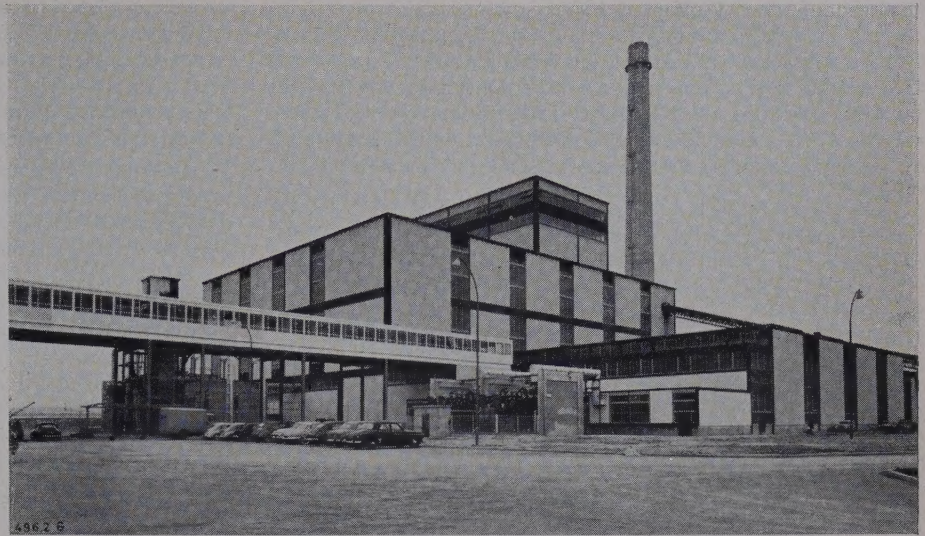


Bild 2. Dampfkraftwerk Montereau.

unermüdlichen Generaldelegierten und Organisator J. Tribot-Laspière mit seinem Stab, dem Französischen Nationalkomitee, den zahlreichen Mitarbeitern aus der französischen Elektroindustrie und Elektrizitätsversorgung, den Fachberichterstatlern, Diskussionsleitern und Rednern sowie den Mitarbeitern in den Studienkomitees. Auch die zahlreichen erschienenen deutschen Fachgenossen, die Berichte vorgelegt, als Diskussionsredner in den Fachgruppen oder bei den Studienkomitees mitgewirkt haben, sind am Erfolg beteiligt. Ihnen allen sei für diese Mitarbeit sowie den vielen persönlichen und korporativen deutschen Mitgliedern für ihre finanzielle Förderung der Ziele der Konferenz, und damit für ihren Anteil am Gelingen der diesjährigen CIGRE-Tagung, der Dank des Deutschen Komitees der CIGRE ausgesprochen.

Dieses Heft enthält anschließend Übersichtsberichte deutscher Fachleute über die wesentlichsten Ergebnisse der einzelnen Fachgruppensitzungen mit kurzen Angaben über den Inhalt der vorgelegten Fachberichte und Auszügen aus den Diskussionsbeiträgen. Ausführliche Referate über die wichtigsten Fachberichte werden laufend im Rundschauteil veröffentlicht werden.

Generatoren

Von Georg Zaar, Berlin *)

DK 061.3(44),1960 : 621.313.322

Wie in den vergangenen Jahren war vom Gruppenberichterstatler Carpentier (Frankreich) ein Sonderbericht über die in der Gruppe „Generatoren“ vorgelegten Fachberichte verfaßt worden, der durch Aufgliedern des Gesamtgebietes und durch bereits vorgenommene Fragestellungen wesentlich zum flüssigen Ablauf der Aussprache beitrug, die unter Vorsitz von Laurent (Frankreich) abgehalten wurde.

Konstruktion und technologische Probleme

Fragen der Hochspannungsisolation von Generatoren behandelt ein Bericht von Ritter (Österreich) und Wohlfahrt (Schweiz). Es werden die üblichen Methoden der Isolationsprüfung (Wechselspannung, Gleichspannung, Verlustfaktormessung) an Hand umfangreicher Unterlagen diskutiert. Die Verfasser kommen zu dem Ergebnis, daß man für eine bestimmte Isolierung mit Hilfe von Meßergebnissen auf Grund von Erfahrungen, die an im Betrieb befindlichen

Maschinen sowie durch Laboratoriumsversuche gewonnen wurden, Aussagen über den Alterungszustand machen kann. Es ist jedoch unmöglich, allgemein gültige Kennwerte festzulegen, die für alle Isolationssysteme Gültigkeit haben.

Auch der Bericht über die Arbeiten des Studienkomitees „Generatoren“ von Laurent und Carpentier (Frankreich) befaßt sich mit der Gleichspannungsprüfung der Wicklungsisolation. Die bisherigen Ergebnisse, z. B. hinsichtlich des Faktors, der das Verhältnis der äquivalenten 1-Minuten-Prüfgleichspannung zur entsprechenden Wechselspannung wiedergibt, rechtfertigen jedoch noch nicht eine abschließende Stellungnahme.

Ein Bericht von Brechna (Schweiz) behandelt die Blechverklebung bei elektrischen Maschinen und Transformatoren. Obwohl offenbar bisher in erster Linie Untersuchungen an Transformatorkernen angestellt wurden, eröffnen sich auch für die Konstruktion von Generatorständen völlig neue Gesichtspunkte.

Auf dem Gebiete der Regelung und Erregung von Generatoren behandelt ein Bericht von Langer und Johansson

*) Dr. techn. G. Zaar ist Oberingenieur und Abteilungsleiter im Dynamowerk Berlin. Bei der Abfassung dieses Berichtes hat H. Achenbach, Erlangen, mitgewirkt.

(Schweden) den Einfluß der polradwinkelabhängigen Erregung auf die Spannungsregelung von Synchronmaschinen. Der günstige Einfluß auf die statische Stabilität kann durch Einführung der ersten und zweiten Ableitung des Polradwinkels (Schlupf und Winkelbeschleunigung) verbessert werden. Die Verwendung dieser Rückführungen führt auch zu einwandfreien Verhältnissen in Übergangszuständen.

Die Berichte von *Hosemann* (Deutschland) und *Pavesi* und *Simonetti* (Italien) befassen sich mit der Gleichrichter-erregung von Synchronmaschinen. *Hosemann* untersucht das Verhalten von Synchronmaschinen mit Erregung durch gittergesteuerte Quecksilberdampf-Gleichrichter bei Blindleistungsstößen. Es werden Deckenspannungen vom 6,6-fachen und 20-fachen der Leerlauf-Erregerspannung angewendet und auf diese Weise sehr kleine Ausregelzeiten erreicht. *Pavesi* und *Simonetti* beschreiben die Erregung eines 28-MVA-Turbogenerators, an den als Hausgenerator besondere Anforderungen gestellt werden. Als Erregung dienen hier ein 400-Hz-Drehstrom-Erregergenerator und Halbleitergleichrichter. Die dynamischen Eigenschaften dieser Erregeranordnung sind günstiger als die herkömmlicher Gleichstrom-Erregermaschinen, erreichen jedoch nicht die optimalen Werte gittergesteuerter Gefäßgleichrichter.

In der Aussprache hielt es *Lang* (Frankreich) für richtig, den Anstieg des Verlustfaktors von Hochspannungs-isolationen nicht als Funktion der Spannung, sondern als Funktion der Beanspruchungszeit mit der Spannung als Parameter anzugeben. Dasselbe Verfahren soll auch für thermische Beanspruchungen angewendet werden. *Strömberg* (Schweden) hält eine Gleichspannungsprüfung der eingebauten, aber noch nicht angeschlossenen Spulen für brauchbar. Er berichtete, daß in Schweden bisher erst bei einer Maschine eine Abnahmeprüfung mit Gleichspannung gleich der 4,5-fachen Nennspannung vorgenommen wurde. Schließlich wies er darauf hin, daß die Ausbildung des Endenglimmschutzes von der Art der Hochspannungsprüfung abhängt.

Wichmann (Deutschland) führte in seinem Diskussionsbeitrag aus, daß neben den zerstörungsfreien Prüfverfahren mit Gleich- oder Wechselspannung auch die in Deutschland übliche Spannungsprüfung mit Wechselspannung gewisse Aussagen über die Güte der Isolation einer Wicklung machen kann. Wenn an einer alten Wicklung bei einer Spannungsprüfung ein Durchschlag aufträte, sei dies ein Zeichen dafür, daß das Isolationsniveau der Wicklung sich einem gerade noch zulässigen unteren Grenzwert der elektrischen Festigkeit nähert. *Wohlfahrt* schlug zusätzlich zu den üblichen Hochspannungsprüfungen eine Wechselspannungsprüfung mit 4-facher Nennspannung für einzelne Stäbe vor. *Leroy* (Frankreich) verwies auf Abweichungen vom Ohmschen Gesetz bei der Gleichspannungsprüfung, die durch Anwesenheit von Feuchtigkeit hervorgerufen werden.

Brechna zeigte Bilder verklebter Maschinenteile, und zwar das Ständerblechpaket eines kleineren Motors und Segmentpakete eines Generators. Er teilte mit, daß bei der Verklebung Füllfaktoren erreicht wurden, die nur 1% unter dem Stapelfaktor lagen.

Yamamura (Japan) berichtete über Anwendungen der lastabhängigen Trockengleichrichter-Erregung, die bei Langsamläufern bis 40 MVA und bei Turbogeneratoren bis 15 MVA ausgeführt wurde. *James* (Großbritannien) teilte mit, daß eine ähnliche Anlage, wie die von *Pavesi* und *Simonetti* beschriebene, seit etwa 2½ Jahren in Betrieb sei. Die Erregeranordnung bestehe aus einer 150-Hz-Haupterregermaschine mit nachgeschalteten Germanium-Gleichrichtern. Der Transduktorregler wird von einer 300-Hz-Hilfserregermaschine mit Dauermagneten gespeist. Außerdem seien Großgeneratoren mit ähnlichen Erregungsanordnungen und Leistungen bis 350 MW bestellt und solche von 500 MW projektiert. Hierfür sind 50-Hz-Haupterregermaschinen mit Silizium-Gleichrichtern vorgesehen.

Barret (Frankreich) verwies auf das Problem des Nulldurchgangs des Erregerstroms beim zweipoligen Kurzschluß schwacherregter Generatoren mit schlechter Dämpfung. *Kostenko* (UdSSR) stellte fest, daß in der Sowjetunion Wasserkraftgeneratoren mit 4-facher Deckenspannung (mit Quecksilberdampf-Gleichrichtern) erregt werden.

Hosemann betonte noch einmal, daß die Stromrichter-Erregung besonders dann in Betracht komme, wenn man mit großen Blindlaststößen rechnen müsse, um die dadurch bedingten Spannungssenkungen möglichst klein zu halten.

Simonetti sagte, daß sich die Bemessung der Gleichrichter nach der höchsten Beanspruchung in Störungsfällen richtet. Stromrichter kommen seiner Meinung nach nicht in Betracht, wenn kein Hilfsgenerator vorhanden ist. *Johansson* teilte mit, daß das Lastwinkelgerät bisher nur für Versuche eingesetzt wurde. Er glaubte, daß der Einsatz einer solchen Einrichtung bei Gleichrichter-erregung besonders günstig sei.

Concordia (USA) bezeichnete die Erregungsgeschwindigkeit als Hauptkriterium für die Beurteilung von Erregeranordnungen sein. Außerdem müsse man immer auch die Deckenspannung betrachten. *Mamikonjantz* (UdSSR) hielt es für notwendig, daß außer der Erregungsgeschwindigkeit die Zeitkonstante des gesamten Erregersystems zur Kennzeichnung einer Erregungsanordnung angegeben wird.

Easton (Großbritannien) schlug als Bezugszeit außer dem bisher verwendeten Wert von 0,5 s zusätzlich den Wert 0,2 s vor. *Parton* (Großbritannien) machte den Vorschlag, endgültige Festlegungen hierüber solange zurückzustellen, bis mit gesteuerten Trockengleichrichtern Erfahrungen vorlägen.

Laurent wies abschließend darauf hin, daß die Definition der Erregungsgeschwindigkeit nach den Bestimmungen der AIEE¹⁾ zur Kennzeichnung moderner Erregungssysteme nicht ausreicht. Er meinte ebenfalls, man solle noch die Zeitkonstante hinzunehmen.

Betriebsverhalten

Die Erfordernisse des englischen Verbundnetzes machten es nötig, Turbogeneratoren als untererregte Blindleistungsmaschinen zu betreiben. Der Bericht von *Powell*, *Mutch*, *Stalewski* und *Toms* (Großbritannien) behandelt die angewendeten Meßmethoden und das Betriebsverhalten von Turbine und Generator. Infolge eines sehr rasch wirkenden Reglers konnten sehr befriedigende Stabilitätsverhältnisse erzielt werden. Die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen lassen sich allerdings nur auf den untersuchten Sonderfall anwenden.

In mehreren Berichten wird der asynchrone Betrieb von Synchrongeneratoren behandelt, was die wachsende Bedeutung dieses Problems beleuchtet. Es interessieren hier der asynchrone Anlauf mit anschließender Grobsynchronisierung, der asynchrone Betrieb nach dem Außertrittfallen, z. B. untererregter Maschinen, und die nachfolgende Selbstsynchronisierung durch Aufschalten der Erregung. *Mamikonjantz* und *Syromjatinikov* (UdSSR) berichteten über die Ergebnisse der Untersuchungen des Verhaltens außer Tritt gefallener Generatoren. Wegen des kleinen Nennlastschlupfs und des kleinen Leerlauf-Kurzschlußverhältnisses wird für Turbogeneratoren der asynchrone Betrieb für die Zeit von 30 min grundsätzlich zugestanden, während Wasserkraftgeneratoren wegen der viel ungünstigeren Verhältnisse bereits nach 30 bis 60 s vom Netz genommen werden müssen. Für die Wiedersynchronisierung asynchroner Netzteile mit genügend großer Zwischenimpedanz liegen sehr günstige Ergebnisse vor. Bis Beginn 1959 hatten von 339 asynchronen Zuschaltungen nur 3 nicht zur Synchronisierung geführt. Ein Bericht von *Čemus* und *Hamata* (Tschechoslowakei) behandelt die Nachbildung asynchroner Betriebszustände von Schenkelpolmaschinen mit Hilfe eines besonderen Analogrechners, der als Zweipol ausgebildet ist und aktive und

1) AIEE = American Institute of Electrical Engineers.

passive Elemente aufweist. Insbesondere wird der Einfluß eines zusätzlichen Widerstandes im Erregerkreis auf Drehmomentverlauf, Größe des Goerges-Phänomens und Drehmomentpulsationen untersucht.

Ausgehend von der Bewegungsgleichung wird im Bericht von *Hano*, *Uenosono* und *Yoshikawa* (Japan) die Selbstsynchronisierung am Netz liegender, asynchron laufender Synchronmaschinen durch Einsetzen der Erregung untersucht. Die theoretisch mit einem Analogrechner gefundenen Ergebnisse stimmen gut mit Meßwerten an im Betrieb befindlichen Maschinen mit Leistungen bis 10 MVA überein.

Georgescu (Rumänien) berichtete in der Diskussion über den Frequenzanlauf abgekuppelter, als Blindleistungsmaschinen betriebener Turbogeneratoren. *Horsby* (Großbritannien) befaßte sich ebenfalls mit den Anlaufmöglichkeiten von Turbogeneratoren. Neben dem üblichen Frequenzanlauf wurde die Möglichkeit erwähnt, den Anlauf über den Erregerumformer vorzunehmen. Dessen Antriebsmotor wird dabei als Asynchrongenerator verwendet, wobei der Turbogenerator die Blindleistungslieferung übernimmt.

Easton (Großbritannien) berichtete, daß die Temperaturerhöhung unmagnetischer Druckplatten bei unterregten Turbogeneratoren nicht besonders hoch sei. *James* (Großbritannien) vermutete jedoch diesbezügliche Schwierigkeiten bei Maschinen höchster Ausnutzung, besonders wenn auf noch kleinere Leerlauf-Kurzschlußverhältnisse übergegangen wird. *Concordia* (USA) bezweifelte die Notwendigkeit des asynchronen Betriebs und hielt es für besser, die Maschinen nach dem Außertrittfallen abzuschalten, um eine Gefährdung des Läufers durch zu hohe Eisentemperatur zu vermeiden. Er bemerkte, daß die Wicklungsbeanspruchung beim Wiedersynchronisieren dann nicht größer sei als beim dreiphasigen Kurzschluß, wenn die Systemreaktanz gleich der Übergangsreaktanz des Generators ist, wobei jedoch die Wellendrehmomente größer sind.

Aylett (Großbritannien) bestätigte die russischen Versuchsergebnisse und verwies auf den Einfluß von Sättigungserscheinungen, die zu einer Erhöhung des asynchronen Schlupfs führen. Nach seiner Meinung ist die Wiedersynchronisierung bei einem Frequenzunterschied von 3 bis 4% immer möglich. *Easton* (Großbritannien) berichtete ebenfalls über erfolgreichen asynchronen Betrieb von zwei 60-MVA-Turbogeneratoren mit direkter Leiterkühlung. *Millar* (Großbritannien) wies auf die Wichtigkeit des asynchronen Betriebs in Entwicklungsländern mit langen Verbindungsleitungen hin. Er stellte die Frage nach den Kenn-

werten der Netze im asynchronen Betrieb. *Parton* (Großbritannien) war der Meinung, daß durch die neuere Entwicklung in der Regelungstechnik das Außertrittfallen zunehmend seltener werden wird. *Apetrei* (Rumänien) gab eine Formel an, die für Schlupfwerte unter 0,5% gute Übereinstimmung mit Meßergebnissen für die in einem Walzenläufer mit Zähnen übertragene Leistung bringt.

Mamikonjantz ging auf die Einwände von *Concordia* ein und berichtete über Temperaturmessungen an mehr als 40 Maschinen. Es wurden jeweils als heißeste Stellen die Läufer-Enden nach 10- bis 20-minütigem asynchronem Betrieb festgestellt; dabei wurde ein Temperaturanstieg von etwas mehr als 10 grd gemessen. Zur Frage des asynchronen Betriebs an sich erklärte er, daß es natürlich Bedingungen gäbe, die ihn ausschließen; jedoch seien die Befürchtungen, die früher hinsichtlich des Außertrittfallens vorhanden waren, durch die bisherigen Untersuchungen zerstreut worden. Weitere Untersuchungen seien erforderlich, wobei das Gesamtsystem gesehen werden müsse und die Erfordernisse des Netzes den Vorrang hätten.

Wirtschaftliche Bemessung von Generatoren

Die Frage der zweckmäßigsten Erzeugung von Blindleistung (durch Generatoren, Blindleistungsmaschinen oder Kondensatoren) wird in einem Bericht von *Dureault*, *Letriliart*, *Therby* und *Valentin* (Frankreich) angeschnitten. Es wird besonders der Einfluß des Leistungsfaktors auf Größe und Verluste von Turbogeneratoren behandelt. Hierbei zeigt sich, daß die Bereitstellungskosten für Blindleistung, die in Turbogeneratoren erzeugt wird, niedriger sind als bei Kondensatoren. Umgekehrt sind die Verluste, besonders wenn man die Übertragungsverluste berücksichtigt, bei umlaufenden Maschinen größer. Zu ähnlichen Ergebnissen, jedoch etwas anderen Zahlenwerten kommt eine Untersuchung von *Happoldt* (Deutschland), die für das Studienkomitee „Generatoren“ durchgeführt wurde.

Carpentier (Frankreich) und *Happoldt* nahmen in der Aussprache zu den unterschiedlichen Ergebnissen der französischen und deutschen Untersuchungen über die Blindleistungserzeugung in Turbogeneratoren Stellung. Es wurde festgestellt, daß die Ausgangspunkte der Untersuchungen unterschiedlich sind. *Parton* (Großbritannien) erwähnte die Möglichkeit, gleichstromvormagnetisierte Drosselspulen zur Aufnahme von Ladeblindleistung zu verwenden. *Letriliart* (Frankreich) wies schließlich darauf hin, daß bei allen Überlegungen über die Blindleistungserzeugung die Notwendigkeit der Aufnahme von Einphasenbelastung im 50-Hz-Netz nicht übergangen werden dürfe.

Transformatoren

Von Viktor Aigner, Stuttgart*)

DK 061.3(44), 1960 : 621.314.21

Der Gruppenberichterstatte des Transformatorgebietes, *Langlois-Berthelot*, hatte einen Sonderbericht vorgelegt, in dem die wesentlichen Fragen, die sich aus den eingereichten Fachberichten ergeben, für die Aussprache zusammengestellt sind. Zur Erörterung standen folgende Berichtsgruppen:

1. Hauptthemen

Große Spartransformatoren, dielektrische Prüfungen und Schutz des Öls und zugehörige Probleme.

Die Berichte von *Rippon*, *Harper* und *Lutz* wurden im Namen des Studienkomitees „Transformatoren“ vorgelegt und stellen Zusammenfassungen der Aussprachen des Komitees aus dem Jahre 1959 in Aix-les-Bains dar.

2. Ergänzende Themen

Lebensdauer von Papier in Öl und Buchholz-Schutz.

3. Frühere Hauptthemen

Kurzschlußbeanspruchungen und Verhalten von Lastumschaltern bei Kurzschluß.

4. Neue Themen

Kerne mit geklebten Blechen.

Im folgenden wird über die einzelnen Fachberichte, anschließend über die zugeordnete Aussprache berichtet.

Große Spartransformatoren

Rippon (England) befaßt sich unter anderem mit der Definition der unmittelbaren und mittelbaren Regelung. Die erste enthält einen magnetischen Kreis und die letzte mehr als einen. In Dreieck geschaltete Tertiärwicklungen scheinen nicht unbedingt erforderlich zu sein, da ein jahrelanger einwandfreier Betrieb auch ohne solche geführt worden ist. Doch erfordert jede Anlage ihre eigene Lösung. Ausgleichs-

*) Dr.-Ing. V. Aigner ist technischer Direktor der AEG-Fabrik in Stuttgart.

wicklungen für 33 1/3 % der Durchgangsleistung werden für alle Normalfälle als ausreichend erachtet, doch kann keine allgemein gültige Regel aufgestellt werden. Die Forderung nach relativ geringer Impedanzänderung bei verschiedener Spannungseinstellung bestimmt nicht die Auslegung von Spartransformatoren. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten und mit Rücksicht auf die Stoßspannungsverteilung ist die unmittelbare der mittelbaren Regelung vorzuziehen, jedoch gestattet die letzte z.B. eine Schrägregelung. Spartransformatoren können wirtschaftlich für die höchsten voraussehbaren Spannungen verwendet werden, wobei Übersetzungsverhältnisse bis 4:1 in Betracht kommen. Es ist jedoch zweifelhaft, ob man sie mit Stufenschaltwerken für eine Spannung über 275 kV ausrüsten wird, da diese zur Zeit eine wirtschaftliche Grenze darstellt. Nach allgemeiner Meinung sind sowohl an den Hoch- als auch Mittelspannungsklemmen Spannungsbegrenzungs-Einrichtungen als Schutz gegen Überspannungen erforderlich, seien es Überspannungsableiter oder Schutzfunkenstrecken oder deren Kombination. Parallel zur Reihenwicklung kommen auch nichtlineare Widerstände oder Ableiter in Betracht. Nichtlineare Widerstände ohne Funkenstrecken parallel zu Regelwicklungen haben sich bewährt. Stoßspannungsprüfungen an großen Spartransformatoren stellen kein besonderes Problem dar.

Frémineur (Belgien) bespricht die Vor- und Nachteile der Spartransformatoren im Vergleich mit Volltransformatoren und bringt einige zahlenmäßige Vergleiche auf Grund neuerer Ausführungen. Vorteilhaft sind die kleine Eigenleistung im Vergleich zur Durchgangsleistung und die kleineren Verluste und Gewichte gegenüber dem Volltransformator. Nachteilig sind die kleinere Reaktanz, die zu höheren Kurzschlußströmen führt, und ferner die unmittelbare Übertragung von Störungen von einer Seite auf die andere, die galvanisch miteinander verbunden sind. Daher sind Ableiter die wirtschaftliche Lösung. Stoßversuche an Modellen der Mantelbauart gestatten die Ermittlung der Beanspruchungen zwischen beliebigen Punkten bei verschiedenen äußeren Bedingungen in weitgehender Übereinstimmung mit dem Original. Für vier Spartransformator-Schaltungen mit unmittelbarer Regelung und konstanter Induktion, d. h. Regelstufen im Bereich der Mittelspannungsklemme, wird die Abhängigkeit der Reaktanz und der Spannungsänderung vom Übersetzungsverhältnis und vom Regelbereich untersucht. Entsprechendes wird für veränderliche Induktion, d. h. Regelstufen im Bereich des Sternpunktes oder der Hochspannungsklemme, durchgeführt. Für die Untersuchung von Spartransformatoren bei Schaltüberspannungen wird eine besondere Versuchsanordnung vorgeschlagen.

Kayser (Kanada) gibt einen historischen Überblick über die Verwendung von Spartransformatoren und weist darauf hin, daß zur Zeit Transformatoren dieser Art für 9 GVA Leistung in den Schaltstationen eingebaut sind, wobei die Überspannung 345 kV erreicht. Die Übersetzungsverhältnisse liegen zwischen 5,9:1 und 1,4:1. Drehstromeinheiten erreichen Leistungen bis 225 MVA. Aus drei einphasigen Einheiten gebildete Drehstromgruppen erreichen 450 MVA Durchgangsleistung. Alle Transformatoren sind in Stern geschaltet und werden mit unmittelbar geerdetem Sternpunkt betrieben, was auch für die angrenzenden Netze gilt. In Dreieck geschaltete Tertiärwicklungen haben 90 % der Transformatoren. Drei verschiedene Schaltungen für die Spannungsregelung werden angegeben. Einheiten für 460/230 kV und 360/160 kV werden zur Zeit gebaut. Die Stoßspannungsverteilungen mit und ohne Belastung der nicht gestoßenen Klemmen werden erörtert, und die Verwendung eines Überspannungsschutzes wird empfohlen. Ersatzschaltungen zum Berechnen der Kurzschlußströme werden angegeben. Ferner wird darauf verwiesen, daß ein einwandfreier Betrieb nur durch geeignete Sternpunkterdung der beiderseits an den Spartransformator angeschlossenen Netze verwirklicht werden kann.

Borodoulin, Petrov und Rabinovitsch (UdSSR) betrachten eingehend die wirtschaftlichen und technischen Vor- und Nachteile von Spartransformatoren mit Tertiärwicklungen und ihre Verwendung in Umspannstationen großer Kraftwerke. Sie führen für die Auslegung von Spartransformatoren eine Vielzahl zu beachtender Gesichtspunkte an, unter anderem die thermische Auswirkung von Streufeldern. Die Verwendung von Spartransformatoren ergibt eine wirtschaftliche Lösung für die Erhöhung der Betriebsspannung vorhandener Übertragungsleitungen. Eine Theorie der Spartransformatoren mit mehreren Wicklungen wird mitgeteilt. Die Betriebserfahrungen mit Spartransformatoren haben gezeigt, daß sie wesentliche Vorteile im Vergleich zu Transformatoren mit getrennten Wicklungen bieten und in Zukunft infolge Zunahme der Leistungen und Spannungen in steigendem Maße Verwendung finden werden.

Nach *Froidevaux, Kratzer und Rossier* (Schweiz) bestimmen die Kurzschlußverhältnisse die mögliche Grenzbeanspruchung der Tertiärwicklung. Für einen 100-MVA-Spartransformator werden, abhängig von den Reaktanzen des Netzes, für verschiedene Netzschaltungen und einpolige Erdkurzschlüsse die Ströme der 20-MVA-Tertiärwicklung ermittelt, und es wird gezeigt, daß sie am größten werden, wenn die Sternpunkte der beiderseitigen Netze isoliert sind, weshalb eine Auslegung der Tertiärwicklung für 1/3 der Durchgangsleistung zweckmäßig ist. Ein Schaubild zeigt den Kurzschlußstrom der Tertiärwicklung für verschiedene Nennleistungen dieser Wicklung, abhängig von der wirksamen Kurzschlußreaktanz. Verschiedene Wicklungsanordnungen für unmittelbare und mittelbare Regelung sind möglich. Da sich ihre Kenngrößen wenig unterscheiden, kann keiner der absolute Vorzug gegeben werden. Der Überspannungsschutz durch Ableiter unterscheidet sich für Volltransformatoren und Spartransformatoren wenig. Ableiter beiderseits des Transformators werden empfohlen, ein Ableiter parallel zur Reihenwicklung wird als unnötig bezeichnet. Die Stoßprüfung fordert die Erdung der nicht gestoßenen Klemmen oder ihren Anschluß an einen Widerstand von 500 Ω , um die Betriebsverhältnisse nachzubilden.

Nach *Rabus* (Deutschland) sind Überspannungsableiter sowohl zwischen der Hochspannungsklemme der Reihenwicklung als auch zwischen der Mittelspannungsklemme von Spartransformatoren und Erde zu empfehlen. Der Schutz der Reihenwicklung gegen Stoßspannungen durch zusätzliche Parallelschaltung von Ableitern gestattet in bestimmten Fällen eine wesentliche Herabsetzung der Isolation der Reihenwicklung, besonders wenn das Übersetzungsverhältnis niedrig ist. Die Beanspruchungen, denen diese Wicklung unterworfen ist, sind durch das gleichzeitige Auftreten von Stoßspannungen verschiedener Höhe zwischen den Klemmen der Wicklung und zwischen diesen und Erde gekennzeichnet. Untersuchungen, die sich auf die Isolationsbeanspruchung im Innern der Wicklung beziehen, sind für zwei Transformatoren an Originalwicklungen in Modellversuchen durchgeführt worden. Aus diesen Versuchen ergeben sich Folgerungen, die sich auf die Konstruktion der Wicklung und Verfahren bei Stoßspannungsversuchen beziehen.

Langlois-Berthelot und Esparbet (Frankreich) beschreiben die Grundlagen des Aufbaues der Wicklungen und der magnetischen Kreise der in der ersten Ausbaustufe des 380/225-kV-Netzes eingesetzten vier Transformatorentypen. Alle Typen sind einphasige Spartransformatoren mit einer Bank-Durchgangsleistung von $3 \times 100/100/30$ MVA und einem Übersetzungsverhältnis von 400-380-360/225/10,5 kV. Die im Sternpunkt der gemeinsamen Wicklung vorgesehenen Regelstufen sind im spannungslosen Zustand umschaltbar. Eine gegebenenfalls spätere Sternpunktregelung unter Last ist möglich. Die Streuspannung zwischen Hoch- und Mittelspannung beträgt 7 %. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen zwischen den 10,5-kV-Leitungen der Tertiärwicklungen, an die man die 35-MVar-Drosselspulen angeschlossen hat,

sind diese durch geerdete Blechplatten getrennt. Für die zweite Ausbaustufe des Netzes ermöglicht ein Schnabelwagen unter anderem ein Transportgewicht von 260 t des Transformators mit selbsttragendem Kessel oder 220 t bei an Balken aufgehängtem normalem Kessel. Eine Untersuchung hat ergeben, daß bei Verwendung von Umstellern im Sternpunkt Einphasen-Spartransformatoren mit 3×200 MVA und Drehstromeinheiten bis zu 300 MVA Leistung zweckmäßig sind, wobei letztere mit einer Tertiärwicklung von 65 MVA versehen werden sollen. Der verschiedene Wicklungsaufbau der bisherigen Einphasentypen wird auch bei den neuen Transformatoren beibehalten. Eine höhere Grenz-Übertemperatur als bisher — 60 grd für Kupfer — wird bei Trennung des Öls von der Luft erwogen. Für einen Typ werden, abhängig von der Streuspannung bzw. den Kupferverlusten je Megavoltampere Leistung, Grenzleistungen für Drehstrom-Spartransformatoren graphisch angegeben.

Im Anhang berichtet *Salgues* über die Berechnung der Kurzschlußströme und Kurzschlußkräfte für die bisherige Anlage unter Berücksichtigung der Netzverhältnisse, derzufolge die Auslegung der Tertiärwicklung unter Berücksichtigung der Netzreaktanzen und der Nullreaktanz des Transformators bei Annahme einpoliger Erdkurzschlüsse durchzuführen ist.

In der *Ausprache* über große Spartransformatoren wurden als Grenzleistung bahntransportfähiger Drehstrom-Spartransformatoren für 380/225 kV Spannung Leistungen bis 520 MVA mit einer Tertiärwicklung für 70 MVA ohne Stufenschaltwerk und ohne Umsteller bei getrennter Kühlanlage angegeben. Vorausgesetzt wird eine Kurzschlußstrombegrenzung auf den 20-fachen Nennstrom. Das Transportgewicht ohne Öl in besonderem Kessel mit Stickstoff-Füllung beträgt 230 t, das Betriebsgewicht 330 t. Für Drehstromsätze aus drei Einphasentransformatoren für 400/270/20 kV Spannung wurde eine Grenzleistung von 1000/1000/333 MVA ohne Regelung bei 190 t Gewicht und 660 MVA einschließlich Regelung und Ölfüllung bei 195 t Transportgewicht der Einheit genannt. Ergänzend wurde eine Leistung von 300 MVA je Strang genannt. Auf die Verminderung der Zusatzverluste durch besondere Maßnahmen wurde verwiesen. Die bekannten Arten unmittelbarer und mittelbarer Regelung genügen allen Fällen der Praxis, jedoch sind innerhalb und außerhalb des Transformators liegende Einflüsse zu beachten. Daher kann eine einheitliche Lösung nicht vorgeschlagen werden.

Bei großem Regelbereich reichen die im Bericht von *Rippon* genannten Schaltungen nicht aus, so daß Zu- und Gegenschaltung der Stufenwicklung erforderlich wird. Die Netzbedingungen ergeben bei Parallelbetrieb von Transformatoren* verschiedener Hersteller und Austauschbarkeit in den Strängen bestimmte Anforderungen bezüglich der Änderung der Impedanz. Bei Transformatoren mit besonders großem Regelbereich und nahe dem Übersetzungsverhältnis 1:1 müssen zur Erzielung ausreichender Impedanz mitunter höhere Verluste vorgesehen werden. Außerdem muß die Netzreaktanz berücksichtigt werden.

Die Wirkung der Tertiärwicklung wurde an Spartransformatoren für 400/100 kV Spannung bei Belastung mit 300 bis 500 MVA durch Abschalten dieser Wicklung geprüft. Es ergaben sich starke Störungen der Fernmeldeleitungen jenseits der zulässigen Grenzen. Eine Tertiärwicklung hat nicht nur für den Kurzschlußfall, sondern auch hinsichtlich der Ausgleichströme für die Magnetisierung und die Gefahr von Resonanzen der dritten Harmonischen mit den Netzkapazitäten Bedeutung. Besondere Vorsicht ist bei Einphasentransformatoren und Transformatoren mit Fünfschenkelkernen geboten, wobei die Netzverhältnisse zu berücksichtigen sind.

Es wurde auch der Standpunkt vertreten, daß Tertiärwicklungen nicht in allen Fällen erforderlich sind, ihre Fortlassung würde eine Kostensenkung oder Leistungssteigerung ermöglichen. Daher ist die Prüfung des Einzelfalles erforderlich. Die Notwendigkeit der Tertiärwicklung im Großtransformator ist noch nicht eindeutig geklärt, es gehört aber besonderer Mut dazu, sie wegzulassen. Hinsichtlich der zur Reihenwicklung parallel geschalteten Ableiter wurde erwähnt, daß eine Stoßprüfung dieser Anordnung nur sinnvoll ist, wenn mittels einer Teileranordnung das Potential der Mittelspannungsklemme des Spartransformators angehoben wird. Für den Fall, daß die Mittelspannungsklemme keinen Ableiter nach Erde hat, haben parallel zur Reihenwicklung geschaltete Ableiter keinen Sinn. Desgleichen gewährt die Anwendung eines Ableiters zwischen Mittelspannungsklemme und Erde und eines Ableiters parallel zur Reihenwicklung ohne einen Ableiter zwischen Hochspannungsklemme und Erde keinen ausreichenden Schutz. Im Fall von 400-kV-Spartransformatoren mit eingebautem Zusatztransformator für mittelbare Regelung werden mit 3 Ableitern die Enden der Regelwicklung und auch die Zwischenanzapfungen geschützt. Bei kleineren Zusatztransformatoren mit kleinem Regelbereich wird meist nur ein Ableiter zwischen zu- und abgehender Leitung eingebaut. Im Hinblick auf die mögliche Änderung der Netzverhältnisse ist ein umfassender Ableiterschutz stets zweckmäßig. Die Zweckmäßigkeit von parallelgeschalteten Ableitern bleibt jedoch umstritten. Um eine lineare Verteilung der Stoßspannung in der Regelwicklung von Spartransformatoren, die räumlich zwischen der Reihen- und der Parallelwicklung liegt, zu erzielen, hat man deren Anordnung zwischen elektrostatischen Schilden empfohlen und die Wirkung in Oszillogrammen nachgewiesen.

Dielektrische Prüfungen

Nach *Harper* (England) wird die derzeit übliche Spannungsprüfung mit Netzfrequenz und Messung mit einem Spannungsteiler allgemein anerkannt, wobei die Spannungs-kurve annähernd sinusförmig sein muß und eine maximale Abweichung von $\pm 10\%$ in allen Punkten von der Sinuskurve zulässig erscheint. Die Steigerung der Prüfspannung innerhalb mindestens 10 s auf den Endwert sowie die Prüfungen mit Fremderregung während 1 min entsprechend den derzeitigen Vorschriften werden allgemein als zweckmäßig angenommen. Für die Prüfung mit Eigenerregung werden die zur Zeit verwendeten Schaltungen erörtert, und die bei Vollisolation bzw. abgestufter und verminderter Isolation zu verwendenden Spannungen angegeben. Die in den verschiedenen Schaltungen auftretenden Spannungen werden miteinander verglichen. Bei Verwendung höherer Frequenzen ist ein Herabsetzen der Prüfdauer zulässig. Damit eine Selbsterregung des Generators vermieden wird, ist bei Höchstspannungstransformatoren für induktive Belastung zu sorgen. Die zur Zeit vorgesehenen Prüfspannungen für Stoß- und Wechselspannung führen zu ungefähr gleichwertigen Beanspruchungen der Hauptisolierung, während die Stoßspannungen die Isolierung zwischen den Windungen und den Spulen abweichend und höher beanspruchen können. Es würde sich aus der ausschließlichen Herabsetzung der Prüfspannungen bei Netzfrequenz keine Ersparnis ergeben. Die Prüfung mit Netzfrequenz weist die Eignung der Isolation für Schaltüberspannungen hinreichend nach, und der 1,3-fache Scheitelwert der Prüfspannung bei Netzfrequenz stellt einen gerechtfertigten Wert für die elektrische Festigkeit eines Transformators gegen Schaltüberspannungen dar, was eine graphische Darstellung der Betriebs- und Prüfspannungen bis 425 kV Netzspannung veranschaulicht. Die Einführung der Stoßprüfung als Stückprüfung würde eine gewisse Herabsetzung der Spannungswerte der mit Netzfrequenz durchzuführenden Prüfung gestatten. Da die derzeitigen Prüfverfahren eine Transformator-konstruktion mit hinreichender natürlicher Festigkeit gegen Schaltüberspannungen geben, würde nach vorliegender Erfahrung durch

eine Sonderprüfung wenig oder nichts gewonnen. Trotz gewisser Vorbehalte — Beschränkung der Prüffrequenz auf 1 MHz — stellt das NEMA-Meßverfahren¹⁾ ein praktisches Verfahren für die Messung der Korona dar. Es ist jedoch wesentlich, die Untersuchungen zum Festlegen einer gefährlichen Höhe der Koronaverluste fortzusetzen.

Meador (USA) berichtet, daß in der Kenntnis der Festigkeit von Transformatoren gegen Schaltüberspannungen beachtliche Fortschritte gemacht worden sind. Das Isoliervermögen gegen Schaltüberspannungen sollte nicht auf das mit Wechselspannungen ermittelte bezogen werden, sondern auf das durch Stoßspannungsmessung nachgewiesene. Er empfiehlt, als Festigkeit gegen Schaltüberspannungen 83 % der Stoßspannungsfestigkeit einzusetzen. Vor Einführung dieser Prüfung sind jedoch noch systematische Messungen in Netzen erforderlich, um eine entsprechende normalisierte Versuchswelle zu ermitteln.

Bei Transformatoren für Drehstrom mit verminderter Isolation darf die Verkleinerung der Prüfspannung für Versuche zwischen den Leitern eine Isolationsklasse nicht überschreiten. Eine Prüfspannung zwischen den Leitern vom 1,6- bis 1,7-fachen der Dreieckspannung erscheint ausreichend. Zweckmäßig ist eine Messung der Korona während der Versuche mit Netzspannung (50 Hz), wobei das RIV-Verfahren²⁾ der NEMA das beste zu sein scheint. Es benutzt eine Meßklemme der Kondensatordurchführung. Die Prüfspannung, bei der die Messung der Korona durchzuführen ist, und der zulässige Betrag der Störspannung sind noch festzulegen. Die Messung der Korona hat einen Stand erreicht, der ihre Behandlung durch die zuständigen Vorschriftenkomitees rechtfertigt. An Stelle der bei Niederfrequenz umständlichen und ungenauen Spannungsmessung mit der Kugelfunkkenstrecke wird die einfachere und genauere Spannungsmessung des Scheitelwertes über einen Spannungsteiler bei Anschluß an die Kondensatorklemme der Transformatordurchführung empfohlen.

Weitere Fortschritte sind erforderlich, bevor die zur Zeit für Prüfungen festgelegten Stoßspannungen und Wechselspannungen geändert werden können. Es werden jedoch Stoßversuche mit einer nach $0,8\mu\text{s}$ abgeschnittenen Wellenstirn empfohlen, die sich bei der Prüfung eines Transformatorentwurfs, der verwendeten Werkstoffe und der Fertigungsqualität bewährt haben.

Hortopan (Rumänien) entwickelt eine Formel für die Berechnung des zeitlichen Ablaufs der Stoßspannung für eine durch einen Transformator und Stoßgenerator gegebene Versuchsanordnung. Dabei wird für den Transformator eine Induktivität eingeführt, die der Grundschwingung des Stoßstromes entspricht und aus der Streuinduktivität abgeleitet wird, wobei das Verhältnis der Längsfluß- und Querflußweglängen der Stromgrundwelle in die Formel eingeht. Die Formel gestattet eine genauere Anpassung des Stoßkreises an die vorgeschriebene Wellenform hinsichtlich der Rückenhalbwertzeit, wie die befriedigende Übereinstimmung von Rechnung und Versuch zeigt.

In der Aussprache über dielektrische Prüfungen wurde über die Ausfälle von Transformatoren durch Schaltüberspannungen berichtet. Diese sind so gering, daß sich bei der derzeitigen Auslegung der Transformatoren praktisch keine Schwierigkeiten ergeben. Die Verwendung der Kugelfunkkenstrecke wurde z.T. befürwortet, es überwog jedoch die Meinung, daß sie durch unmittelbar anzeigende Meßgeräte (Scheitelwertmesser) ersetzt werden wird, zumal sie auch oft einen großen Störpegel bei Messungen der Korona ergibt. Die Kugelfunkkenstrecke bleibt als Vergleichsgerät,

als Schutzfunkenstrecke und zum Abscheiden von Stoßspannungen.

Bezüglich der Prüfung mit induzierter Spannung wurden die gegenwärtig vorgeschriebenen Werte anerkannt. Die Prüfspannung zwischen den Wicklungssträngen sollte nicht unter das 1,6-fache der Nennspannung herabgesetzt werden. Jedoch wurde auch die Beibehaltung des Faktors 2 für im Sternpunkt starr geerdete Transformatoren für zweckmäßig gehalten. Eine zu starke Senkung der Prüfspannung würde die Festigkeit gegen Schaltüberspannungen in Frage stellen. Bei Transformatoren mit voller Isolation sollte die Prüfspannung zwischen den Wicklungssträngen jedenfalls beim Prüfspannungsfaktor 2 bleiben, weil hierbei der Ableiterschutz nicht so wirksam ist wie bei starrer Sternpunkterdung. Als Prüfschaltung ist diejenige zu wählen, die den wirtschaftlichsten Transformator ergibt. Die zweckmäßig gewählte Prüfschaltung ist stets ein Kompromiß zwischen Prüferfordernis und Prüfmöglichkeit. Da ihr Einfluß auf den Transformatorentwurf jedoch bedeutend sein kann, muß die Prüfschaltung vor Auftragserteilung geklärt werden. Es wurde auf die Schaltungen hingewiesen, mit denen nach den VDE-Bestimmungen die Wicklungsprüfung mit Eigenregung durchgeführt wird. Lediglich bei der Prüfung von Erdschlußspulen werden Schaltungen mit Zusatztransformatoren verwendet. Trotz Herabsetzung der Prüfzeit ergeben sich bei erhöhter Frequenz schärfere Beanspruchungen, insbesondere bei Überschreitung derjenigen Spannung, bei der Korona aufzutreten beginnt. Als obere Grenzfrequenz wurden 250 Hz angegeben.

Prüfungen mit Schaltüberspannungen wurden fast allgemein abgelehnt, zumal sie durch Betriebserfahrungen nicht gerechtfertigt erscheinen. Die Isolationsfestigkeit gegen Schaltüberspannungen wird durch Stoßspannungs- und Wechselspannungs-Prüfungen ausreichend nachgewiesen. Die relative elektrische Festigkeit gegen Schaltüberspannungen mit 80 bis 85 % des Vollwellenpegels bzw. 130 % der Wechselspannungsfestigkeit wurde allgemein anerkannt, Schalter und Ableiter sollten höhere Überspannungen nicht erzeugen bzw. zulassen. In letzter Zeit vorgeschlagene zusätzliche Prüfungen, zu denen auch die Steilwellenprüfung gehört, seien übertrieben und könnten dazu führen, daß die Transformatoren vornehmlich für die Prüfung konstruiert und dadurch zu teuer werden. Stoßprüfungen nehmen zu, doch wurde empfohlen, die Stoßprüfung als Stichprobenprüfung durchzuführen, die Prüfungen mit abgeschnittener Welle oder mit Steilwelle sollten von den Netzverhältnissen und den Transformatorenleistungen abhängig gemacht werden. Eine Stoßprüfung mit abgeschnittener Welle und Steilwelle ist insbesondere dann nicht erforderlich, wenn die Leitungen wie bei Netzen mit Spannungen über 220 kV mit Erdseilen und Ableitern ausgerüstet sind, die abgeschnittene Wellen verhindern. Bei Steilwellen ist nicht gewährleistet, daß sie in die Wicklung eindringen. Die Prüfung ist außerdem mit großem Aufwand verbunden. Eine Abweichung der Stoßwelle von der Normalwelle bei 400-kV-Transformatoren bis etwa auf $3,5/30\mu\text{s}$ erscheint tragbar, weil in Anlagen höchster Spannungen solche Wellenformen auftreten. Diesbezügliche Festlegungen sind erwünscht.

Die Messung der Funkstörspannung im Hinblick auf innere Korona dürfte keinen Vergleich von Transformatoren gestatten, denn Untersuchungen an einer Erdschlußspule mit Hilfe eines Koronanormals zeigten bei selektiver Messung große Unterschiede, wenn das Normal am Eingang oder an einem Punkte der Wicklung angeschlossen war, der 75 % der Wicklung entsprach. Es sollten für die Koronamessung Instrumente mit einer bestimmten Bandbreite verwendet und die Koronaladung erfaßt werden. Breitbandmessungen auch mit Kathodenstrahloszillograph wurden mehrfach empfohlen, andererseits wurde die Messung der Korona nach den NEMA-RIV-Bestimmungen bei Nennfrequenz und 120 % der Nennspannung empfohlen. Es wurde verlangt, daß bei 115 % der Nennspannung keine Korona auftritt.

1) NEMA = National Electric Manufacturers Association.

2) RIV = Radio-Influence-Voltage.

Schutz des Öls und zugehörige Probleme

Lutz (Schweiz) gibt einen Überblick über die Gesetze der Alterung der in Transformatoren verwendeten Isolierstoffe, insbesondere der Zellulose und der Mineralöle, und schließt eine eingehende Untersuchung der derzeit verwendeten Schutzsysteme für Transformatorenöl an. Man hat bisher noch kein vollkommenes Schutzsystem gefunden, obwohl bereits sehr gute Vorrichtungen in Betrieb sind. Er erörtert die Vorteile und Nachteile folgender Schutzarten: Lufttraum unter Deckel ohne und mit Trockenvorlage, Stickstoffpolster unter Deckel, Ausdehnungsgefäß ohne und mit Trockenvorlage, durch Gummimembrane abgeschlossenes Ausdehnungsgefäß ohne und mit Trockenvorlage, Trennung des Transformatoröls vom Öl im Ausdehnungsgefäß durch eine zusammendrückbare Tasche, dauerndes Vakuum im Ausdehnungsgefäß, Stickstoffabschluß unter konstantem Druck mit Stickstoffflasche oder mit Ausdehnungsgefäß mit zwei Fächern oder Atmungssäcken mit Trockenvorlage.

Zu den mittelbaren Maßnahmen, die Alterung des Öles zu verlangsamen, gehören die Bodenöl-Erwärmung mit heißem Öl aus dem Deckelbereich bei entsprechender Temperatursenkung des Deckelöls und die dauernde Filterung des Öls durch Fullererde.

Der ursprüngliche Konservator hat noch nicht seine allgemeine Beliebtheit verloren, jedoch werden neue Wege gesucht, um seine Unvollkommenheiten zu überwinden. Gefahren, die bei abgeschlossenem Stickstoff unter Druck aufgetreten sind, machen ein vertieftes Studium dieses Prinzips erforderlich. Neue Lösungen, wie die Verminderung der höchsten Kupfertemperatur durch Drehung der Temperaturcharakteristik oder die Verwendung von Inhibitoren³⁾ können einen Ölschutz nicht ersetzen aber ergänzen. Dieser muß möglichst einfach und ohne Gefahr für den Transformator sein. Der Schutz von Transformatoren, die mit unbrennbaren Flüssigkeiten gefüllt sind, wird behandelt. Neuere Schutzeinrichtungen zur Löschung von Transformatorbränden wie das Einblasen von Stickstoff in den Bodenbereich des Kessels bei automatischem Senken des Ölspiegels werden beschrieben. Die Kontrolle des Alterungszustandes und die Wartungsarbeiten in Bezug auf Öl und feste Isolierstoffe werden besprochen.

In der Aussprache über den Ölschutz wurde darauf hingewiesen, daß es vor allem gilt, im Betrieb Wasser und Sauerstoff aus dem Öl und damit aus der Papierisolierung fernzuhalten, wobei Druckerhöhungen, die bei völlig abgeschlossenem Ausdehnungsgefäß möglich sind, mit Rücksicht auf Gasblasenbildung zu vermeiden sind. Erfahrungsgemäß ist die klassische Ölkonservierung mit Ausdehnungsgefäß und Silikagelvorlage bei sorgsamer Wartung bis zu den höchsten Spannungen befriedigend. Von besonderem Interesse ist das Gleichgewicht von Wasser in Öl und Papier, das zuungunsten des Papiers — höherer Wassergehalt — ausfällt. Durch Filterung beim Ölumlauft nach dem Thermosyphonprinzip gelingt es zwar, das Öl in kurzer Zeit zu trocknen, aber die Einrichtung wurde nicht als allgemeine Dauermaßnahme empfohlen. Durchschläge der Isolierung wurden oft auf Überspannungen zurückgeführt, tatsächlich war die Isolation durch Feuchtigkeit verkleinert. Daher haben sich voll abgeschlossene Transformatoren am besten verhalten, solche mit kontrollierter Atmung blieben noch betriebstüchtig, solche mit freier Atmung waren schlecht. Der Abschluß von Ausdehnungsgefäßen durch Gummimembranen, die feuchtigkeitsundurchlässig sind, soll eine Ausdehnung der Revisionszeit auf etwa 30 Jahre gestatten. Infolge der Gleichgewichtsverhältnisse tritt bei Belastungserhöhungen Wasser aus der Papierisolation in das Öl und gibt, wenn dieses den Wassergehalt nicht abgeben kann, eine Ölverschlechterung. In diesem Zusammenhang wurde

die Festsetzung zulässiger Grenzmengen für Wasser und Sauerstoff in der Isolierung angeregt.

Das Schutzsystem mit Stickstofffüllung des Ausdehnungsgefäßes, Trocknungsvorlage und Atmungssäcken hat bei minimalem Stickstoffverlust nur bedeutungslose Feuchtigkeitsspitzen zur Folge. Da die Trocknungsvorlage auch aus dem Öl stammende Feuchtigkeit absorbiert, wird das System bei hunderten von Transformatoren mit bestem Erfolg verwendet. Der Platz für die Atmungssäcke ist im allgemeinen vorhanden. Durch den Stickstoffabschluß ging die Fehlerzahl etwa auf $\frac{1}{8}$ zurück. Ein Feuchtigkeitseintritt durch Schweißnähte am Kessel ist praktisch bedeutungslos. Bei Platzmangel kommen Stickstoffflansche mit Reduzierventil und Überdruckventil in Betracht. Das Ausdehnungsgefäß mit zwei Kammern und Stickstofffüllung schützt zwar nicht gegen Sauerstoffaufnahme, ist aber doch gut und wird auch in Dreikammerausführung gebaut. Da neues Öl trotz ausreichender Durchschlagsfestigkeit einen großen Verlustwinkel haben kann, hat sich das Messen des $\tan \delta$ bewährt. Die Frage der Ölqualität erfordert besondere Aufmerksamkeit. Es gelingt selbst bei alten Transformatoren, durch Ölaustausch und Zwischenevakuierung noch Feuchtigkeit und schlechtes Öl aus den Isolierstoffen zu entfernen, so daß dadurch der Verlustwinkel auf 50 % des früheren Wertes sinkt. Dauernder Ölschutz ist jedoch zweckmäßiger als zeitweiser Austausch. Da die Lebensdauer der Isolation bereits bei einer Temperaturerhöhung um 5,5 grd halbiert wird, ergibt eine Senkung der Temperatur der heißesten Punkte der Wicklungen eine Lebensdauererhöhung. Bei Transformatoren mit natürlicher Kühlung ergibt die Förderung heißen Öles aus dem Deckelbereich in den Bodenbereich durch Pumpen kleinster Leistung bei kaum veränderter mittlerer Kupfertemperatur eine Temperaturerhöhung des unteren und eine Temperatursenkung des oberen Wicklungsendes, die mindestens einer Lebensdauerverdoppelung entspricht. Unter Beibehaltung der Höchsttemperatur, also unveränderter Lebensdauer, gestattet das Verfahren eine dauernde bemerkenswerte Leistungssteigerung des Transformators.

Lebensdauer von Papier in Öl

Fabre und Pichon (Frankreich) berichten, daß die Papierisolierung sich während des Betriebes ständig verschlechtert, bis sie am Ende stark gebräunt, zerbrechlich und spröde ist. Der Transformator ist dann dem ersten Kurzschluß ausgeliefert, dessen elektromagnetische Axialkräfte das Papier zerstören. Die langsame Entfestigung des Papiers ist durch das Zerbrennen makromolekularer Ketten der Zellulose unter der Einwirkung verschiedener Oxydationsvorgänge bedingt. Die mechanischen Eigenschaften nehmen mit der mittleren Länge der Zelluloseketten ab, die durch den Polymerisationsgrad (rd. 1200 bei neuem Papier) ausgedrückt werden kann. Die Gesetze der Entfestigung ölprägnierten Papiers werden unter eindeutigen Bedingungen ermittelt. Es wird gezeigt, daß die Reißlänge mit dem Polymerisationsgrad sinkt und daß unterhalb eines Polymerisationsgrades von 150 das Papier keinerlei mechanische Festigkeit mehr hat. Die Hauptursachen der Entfestigung sind die Temperatur, der Sauerstoff und die Feuchtigkeit. Das Montsingersche Lebensdauerengesetz wird grundsätzlich bestätigt, demzufolge eine Halbierung der Lebensdauer bei einer Temperatursteigerung um 8 grd eintritt; hier werden jedoch 5,5 grd ermittelt. Mit dem Luftsauerstoff in Verbindung stehendes Papier unter Öl altert 2,5 mal schneller als unter Vakuum. Die thermische Entfestigungsgeschwindigkeit des Papiers ist dessen Wassergehalt proportional, der somit von besonderer Bedeutung ist. Dieser kann einem Schaubild in Abhängigkeit von der Öltemperatur, Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit entnommen werden. Das Öl schützt das Papier nicht gegen die Luftfeuchtigkeit. Sofern das Öl mit der freien Luft in Berührung steht, verlangsamt

³⁾ Inhibitor ist ein Zusatz zum Öl, der die Alterung verlangsamt.

es jedoch die Ausgleichsvorgänge. Maßnahmen, die das Öl trocken halten, und eine Berührung des Öls mit der Außenluft verhindern, erhöhen die Lebensdauer oder gestatten einen Betrieb bei höheren Temperaturen.

In der Aussprache über die Lebensdauer von Papier in Öl wurde erwähnt, daß Papier sehr hygroskopisch ist und Wasser zu seiner eigenen Zerstörung aufspeichert. Daher ist vor allem Feuchtigkeit fernzuhalten. Der stärkere Einfluß des Wassers im Vergleich zum Sauerstoff ist dadurch bedingt, daß das Öl wohl den Sauerstoff nicht aber das Wasser von der Papierisolierung abhält. Der Sauerstoff wirkt erst durch die Oxydationsprodukte des Öles ein. Da steigende Temperatur den Feuchtigkeitsgehalt des Papiers senkt, ergibt sich die Frage nach der zweckmäßigsten Temperatur. Eine Untersuchung gealterten Papiers längs einer Spule wäre von Interesse, da vielleicht die Temperatur des heißesten Punktes infolge der Gegenläufigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit weniger wichtig als die mittlere Temperatur sein könnte. Bei rascher und starker Temperatursteigerung wird Wasser aus dem Papier ins Öl getrieben, das dort nicht gelöst wird, so daß die Durchschlagsfestigkeit des Öls zurückgeht. Die Gefahr vorzeitiger Alterung besteht besonders bei hoch belasteten oder überbelasteten Transformatoren, also bei solchen mit hoher Öl- und Papiertemperatur. Die einwandfreie Isolation vieler ausgeschlachteter Transformatoren zeigte, daß sie nicht wirtschaftlich ausgenutzt waren. Im allgemeinen können also höhere Temperaturen als bisher zugelassen werden, insbesondere wenn Feuchtigkeit ferngehalten wird. Da sehr alte Transformatoren teilweise sehr kleine Verlustwinkel hatten, bleibt die resultierende Wirkung von Wasser, Sauerstoff und Temperatur auf Öl und Papier im Transformator noch offen. Die Frage der zweckmäßigsten Ölart ist bisher nicht geklärt. Auf den die Oxydation beschleunigenden Einfluß des heißen Kupfers, ferner von Eisen und Mangan wurde verwiesen. Ein Schwefelgehalt des Öls konnte als für Papier nicht schädlich nachgewiesen werden. Es wurde die Anregung gegeben, in die Transformatoren Vorrichtungen einzubauen, in denen das Papier ebenso beansprucht wird wie in der Wicklung.

Buchholz-Schutz

Haberl, Madill und Smith (Kanada) berichten über 25-jährige Betriebserfahrungen mit Gasanzeige-Relais für Meldung und Auflösung, die an 1600 Transformatoren angebaut sind. Die von der CGEC⁴⁾ hergestellten Relais haben selbst kleine Fehler im Anfangsstadium gemeldet. Die teilweise Absorption von Gas durch das Öl behindert das einwandfreie Arbeiten des auf Gasansammlung ansprechenden Teils des Relais nicht. Für die Untersuchung des angesammelten Gases werden abgeschmolzene Glasröhrchen mit einer Füllung aus mit Permanganat behandeltem Silikagel verwendet, durch die nach Abbrechen der Spitzen das Gas geleitet wird. Der Farbumschlag zeigt die Anwesenheit ungesättigter Kohlenwasserstoffe an. Außerdem wird noch ein Gasprüfgerät „Vapotester“ verwendet, das nach dem Prinzip der Wheatstone-Brücke arbeitet und den Brennbarkeitsgrad durch einen Zeigerausschlag anzeigt. Fehlauslösungen sind unter anderem bei der Inbetriebsetzung von Ölpumpen, mechanischen Vibrationen und Erdbeben und bei niedrigem Ölstand aufgetreten. Die Kontrolle wird durch langsames oder plötzliches Einpumpen von Luft durchgeführt. Keine andere Relaisart hat vergleichbar zur Feststellung entstehender oder bestehender Fehler beigetragen.

Balériaux und Brohet (Belgien) führen Fehlauslösungen beim Buchholz-Schutz auf Beschädigungen und anormale Empfindlichkeit bei mechanischen Stößen äußeren oder inneren Ursprungs — Erdbeben, Einschaltvorgänge oder äußere Kurzschlüsse — und bei erhöhter Ölgeschwindigkeit

— plötzliche Belastung, äußere Kurzschlüsse — zurück. Die Ursachen für das normale und anormale Ansprechen werden eingehend untersucht. Abhilfemaßnahmen dürfen keinesfalls die Ansprechgeschwindigkeit und Empfindlichkeit der Relais beeinträchtigen. Erschütterungsunempfindlichkeit wird bis zu Schwingungsweiten von 20 mm bei Horizontalbeschleunigungen von 15 bis 20 % der Fallbeschleunigung gefordert, was durch Einstellen eines Schaltwinkels von 15° der Quecksilberrohren erreichbar sein soll. Weitere Untersuchungen werden angeregt, und Vorschläge für die Aufstellung von Normen für Eichung und Kontrolle der Buchholz-Relais werden vorgetragen.

Die Aussprache über den Buchholz-Schutz wurde aus Zeitmangel der Gruppe 31, Schutz und Relais, überwiesen. Hier wurde auch über Erfahrungen mit Buchholz-Relais und das Konstruktionsprinzip eines neuen bei sonst unveränderter Empfindlichkeit weitgehend bis zur Fallbeschleunigung und 40 mm Schwingungsweite erschütterungssicheren Buchholz-Relais mit zwei ringförmigen Quecksilberschaltröhren je Stromkreis berichtet.

Kurzschlußbeanspruchungen

Christoffel und Hurter (Schweiz) leiten ein Verfahren ab, das an Modellen die Untersuchung radialer Beanspruchungen in Transformatorwicklungen gestattet. Über Versuche an Modellen, bei denen die Dehnung des Kupfers der Wicklungen mit Dehnungsmeßstreifen gemessen worden ist, wird berichtet. Kurzschlußströme mit Netzfrequenz von 0,3 s Dauer rufen wesentlich kleinere vorübergehende und bleibende Deformationen hervor als gleich große statische Kräfte. Selbst bei einer steigenden dynamischen Beanspruchung bis zu 1000 kp/cm² sind die bleibenden Deformationen eindeutig geringer als die vorübergehenden. Die Zugfestigkeit bestimmt die Widerstandsfähigkeit gegen Kurzschlüsse. Die hauptsächlich auf Druck beanspruchte innere Wicklung ist widerstandsfähiger als die auf Zug beanspruchte äußere Wicklung. Eine bleibende Dehnung von 0,2 % stellt die Grenze für die zulässige Beanspruchung dar. Die Widerstandsfähigkeit einer Wicklung gegen Kurzschlüsse hängt von der Art ab, in der sich die höchstbeanspruchten Windungen, die dem Streukanal benachbart sind, auf die entfernteren Windungen abstützen können.

In der Aussprache über die Kurzschlußbeanspruchungen wurde der Einfluß der Kaltdehnung auf die Festigkeit des Kupfers erwähnt, die über Jahrzehnte erhalten bleibt. Eine Dehnung tritt auch bei der Umspinnung der Leiter auf. Solche Leiter sind bei den Versuchen verwendet worden. Die Verunreinigung des Kupfers ist für die Festigkeit von geringer Bedeutung. Die im Bericht festgestellte höhere Kurzzeitfestigkeit könnte durch eine Vordehnung des Kupfers bedingt sein. Die photographische Untersuchung eines Transformators in Luft mit 2000 Bildern/s führte zu Ergebnissen, die dem Bericht entsprechen. Das Verhalten der inneren Wicklungen kann durch Modellversuche nicht vollständig nachgebildet werden, doch wurden auf den eigentlichen Transformator übertragbare Erkenntnisse gewonnen. Die Versuche wurden durch Werkstoffuntersuchungen bei dynamischen Beanspruchungen ergänzt. Die Prüflinge aus Kupfer wurden dabei zwischen gegensinnig stromdurchflossene Sammelschienen eingespannt. Es ergaben sich, wie im Bericht erwähnt, bei dynamischer Beanspruchung geringere Dehnungen als bei statischer. Transformatoren können daher für dynamische Beanspruchungen unter Berücksichtigung des statischen Verhaltens ausgelegt werden. Neben der Schwere der Stoßbeanspruchung spielt auch noch die Zahl der Stöße eine Rolle, die der Bericht nicht berücksichtigt, so daß aus ihm noch keine Konstruktionsdaten abgeleitet werden können, zumal auch die zusätzlichen axialen Beanspruchungen außer Betracht geblieben sind, die unter

4) CGEC = Canadian General Electric Comp.

Umständen größer als die radialen sein können. Weitere Versuche sind erforderlich, um das statische und dynamische Verhalten vollständig zu klären, zumal die Beanspruchung in der Wicklungsmitte einen Höchstwert hat, was konstruktiv zu berücksichtigen ist.

Die Anwendung der Ergebnisse an einem zweilagigen Transformator auf einen Transformator mit 10 bis 12 Lagen ist schwierig, doch ist die Kraftübertragung größer als erwartet.

Lastumschalter

Frowein und Wildeboer (Holland) legen dar, daß die Betätigung eines Lastschalters mit einem Kurzschluß im Netz oder an den Klemmen eines Transformators zusammenfallen könne. Bei Versagen des Schalters kann ein Wicklungskurzschluß auftreten, der zu einem Ausfall des Transformators führen kann. Geeignete Maßnahmen vermindern die Gefahr des Eintritts solch schwerer Störung. Diese sind der Einbau eines Schutzes gegen die Durchführung einer Lastumschaltung bei Überlast. Für diesen Fall wird eine Störwahrscheinlichkeit von 1 % während 25 Jahren berechnet. Ferner kann der Lastschalter für Schalten unter Kurzschluß ausgelegt werden. In diesem Fall können beim Lastschalter unter Öl neue Störungsmöglichkeiten und Nachteile auftreten, welche die erhofften Vorteile vermindern, so daß sich etwa eine gleiche Störungswahrscheinlichkeit ergibt wie ohne diese Auslegung. Zu den Nachteilen gehören auch eine 50-prozentige Erhöhung der Kontaktabnutzung und der Verschmutzung, wenn das Verhältnis des Nennstromes I_N zum Ausgleichsstrom I_A über die Schaltwiderstände statt des für Normalbetrieb günstigsten Wertes von 2 gleich 1,5 gewählt wird, um die Schaltleistung zu vermindern. Für Transformatoren normaler Bedeutung wird empfohlen, den Lastumschalter unter Öl üblicher Bauweise zu verwenden.

Für Transformatoren großer Bedeutung hingegen werden Lastumschalter mit Druckluftbeblaspung empfohlen, die keine Zusatzmaßnahmen erfordern, um unter hoher Überlast, d. h. Kurzschluß, störungsfrei schalten zu können. Abgesehen von der erforderlichen Druckluftanlage bringt diese Lastschalterart keine neue Störungsgefahr und bietet als Vorteil unter anderem eine sehr geringe Verschmutzungsneigung, das Fehlen der Brand- und Explosionsgefahr und eine leichte Zugänglichkeit zu den wesentlichen Teilen.

In der Aussprache über Lastumschalter wurde auf die Erleichterung der Löschung verwiesen, die erzielt wird, wenn die Löschung am Hauptkontakt während der Einschalt-dauer beider Überschalt-Widerstände geschieht. Dies wird durch Erhöhen der Umschalt-dauer auf 100 ms erreicht, während dieser Zeit sind beide Umschaltwiderstände 40 ms eingeschaltet. Unter dieser Voraussetzung wird für die meisten Fälle empfohlen, das Verhältnis Nennstrom I_N zum Ausgleichsstrom I_A gleich 2 beizubehalten, bei dem sich gleicher Abbrand an Haupt- und Widerstandskontakten ergibt. Die quadratische Abhängigkeit des Kontaktabbrandes vom Unterbrechungsstrom erscheint mit Rücksicht auf Lichtbogen-dauer, Kontaktform und Kontaktwerkstoff erfahrungsgemäß nicht als gesichert. Die Menge der Zersetzungsprodukte des Öles hängt nicht nur von den Lichtbogenströmen, sondern vornehmlich von der Schaltarbeit ab, so daß sich bei Übergang des Verhältnisses $I_N/I_A = 2$ auf $I_N/I_A = 1,5$ eine kleinere als 50-prozentige Erhöhung der Verschmutzung ergibt. Bei einer Umschaltzeit entsprechend 10 Halbwellen und $I_N/I_A = 1,33$ sind am Hauptkontakt 119 MVA und am Widerstandskontakt rd. 62 MVA einwandfrei geschaltet worden.

Die im oben erwähnten holländischen Bericht geäußerte Meinung, daß Maßnahmen zur Erhöhung der Schaltleistung bei Kurzschlußschaltungen neue Schadensmöglichkeiten herbeiführen, wurde widersprochen und darauf hingewiesen, daß sinnvolle konstruktive Maßnahmen eine größere Betriebssicherheit gewährleisten. Prinzipiell interessante Lastumschalter mit Luft- oder Druckluftbetrieb dürften in der Praxis keine Vereinfachung der Stufenschaltung unter Last ergeben.

Magnetische Kerne mit geklebten Blechen

Brechna (Schweiz) weist darauf hin, daß die Kerne von Transformatoren gewöhnlich aus dünnen Blechen geschichtet und mit Bolzen oder Nieten, in bestimmten Fällen durch Schweißung zusammengepreßt werden. Dadurch ist aber eine Erhöhung der Kernverluste, unter anderem durch Schädigung der Kristallorientierung kaltgewalzter Bleche, durch hohe Pressung und Stanzgratkontakte, ferner ein Werkstoffverlust infolge der Bolzenlöcher, eine Erhöhung des Geräuschpegels und der Herstellungskosten bedingt, die dazu führen, die Verbindung der Bleche nicht mehr durch mechanische Preßeinrichtungen, sondern durch Klebstoffe vorzunehmen.

Für die Verklebung der Bleche stehen Epoxydharze, Phenolharze und nicht gesättigte Polyesterharze zur Wahl, deren Eigenschaften dargelegt werden. Epoxydharze vertragen Temperaturen bis zu 160 °C ohne Beeinträchtigung ihrer mechanischen Qualität, ihre geringe Viskosität, die vor allem hinreichend lange bestehen bleibt, ermöglicht die Blechverklebung ohne Druck oder Vakuum. Die Verwendung durch Phosphatierung isolierter Bleche hat sich als günstig erwiesen. Die Kerne werden im geschichteten Zustand verklebt. Geeignete Vorrichtungen ermöglichen die bei der Endbehandlung nötige Pressung. Nach teilweise verminderter Pressung wird das Harz senkrecht auf die Schnittflächen des Kernes aufgebracht. Es dringt unter dem Einfluß der Kapillarwirkung und seines Gewichtes zwischen die Bleche ein. Nach Beendigung der Tränkung wird die Pressung erhöht, wodurch der Klebstoff als feine Haut die gesamte Blechfläche benetzt. Nach der Aushärtung und Entfernung der Spannvorrichtung ist der Kern selbsttragend. Dieses Verfahren hat sich bis zu Leistungen von 10 MVA bewährt. Infolge der guten Isolierung der geklebten Bleche sind Preßspannzwischenlagen im Kern unnötig. Die Joche erhalten eine verminderte Zahl von Bolzenlöchern, wobei eine Pressung der Bleche mit 3 bis 4 kp/cm² ausreicht. Durch das Verfahren werden Füllfaktoren bis 97 % erreicht. Neben einer Geräuschminderung ist es möglich, die Kernverluste von Transformatoren bis zu 5 MVA Leistung um 18 bis 22 % gegenüber normal geschichteten Transformatoren zu senken, so daß die Eisenverluste nach *Epstein* nur um 20 % überschritten werden.

In der Aussprache wurde über geklebte Kerne bis 30 MVA Leistung ohne Bolzenlöcher berichtet, die eine Herabsetzung des Füllfaktors ergaben. Das Prinzip sei bei Öltransformatoren nicht besonders wirtschaftlich, jedoch bei Trockentransformatoren für feuchte und korrodierende Atmosphäre von besonderem Interesse. Es wurde erwidert, daß anfänglich 1-MVA-Kerne und anschließend 10-MVA-Kerne geklebt wurden. Sie haben niedrige Verluste und können leicht hergestellt werden. Bei größeren Transformatoren sind die Ölkanäle wichtig, die in die Klebung einbezogen werden, so daß geklebte Kerne bis zu den größten Leistungen möglich sind. Gegenüber normalen Kernen ändert sich der Füllfaktor nur um 1 %. Die Wirtschaftlichkeit geklebter Kerne sei sowohl für Öl- als auch Trockentransformatoren erwiesen.

Schaltgeräte

Von August Hochrainer, Kassel *)

DK 061.3(44)„1960“ : 621.316.5

Die vorliegenden 15 Berichte wurden in die nachstehenden 5 Gruppen aufgeteilt und zur Aussprache gestellt.

Nachstrom

Die Einrichtungen für die Nachstrommessungen sind an verschiedenen Stellen so vervollkommen worden, daß man bereits über ziemlich zuverlässige Meßergebnisse an verschiedenen Schaltertypen verfügt. Nur in den Grenzbereichen und bei verschiedenen zur Vereinfachung der Messungen angewendeten Maßnahmen wurden Zweifel über die Zuverlässigkeit der Ergebnisse in der Aussprache geäußert. *Ter Horst*, *Rutgers* und *Bisht* zeigen in ihrem Bericht, daß bei Erhöhung der Betriebsfrequenz auf das Zehnfache und gleichzeitiger Verminderung des Ausschaltstromes auf ein Zehntel der Nachstrom unverändert bleibt. Der Bericht enthält eine ausgezeichnete Zusammenstellung aller bisher veröffentlichten Meßergebnisse über den Nachstrom. Von deutscher Seite (*Kopplin* und *Schmidt*) wurde über Nachstrommessungen an ölarmen Schaltern für 10 und 110 kV berichtet und in der Aussprache noch mitgeteilt, daß vollständige Übereinstimmung der Messungen bei direkter und bei synthetischer Prüfung der Schalter erzielt wurde.

Passaquin und *Rieder* kamen auf Grund ihrer Untersuchungen zu einer Unterteilung der Löschung von Wechselstromlichtbögen in drei Klassen. Bei den beiden ersten ist ein Wiederzünden des Schalters als Durchschlag aufzufassen, während bei der dritten Klasse mit dem Nachstrom zusammenhängende thermische Vorgänge eine wesentliche Rolle spielen können. Die Aussprache, in der weitere Meßergebnisse von verschiedenen Sprechern gebracht wurden, behandelte überwiegend die Frage des Zustandekommens des Nachstromes im Lichte der verschiedenen Theorien. Ein direkter Einfluß des Nachstromes auf die Leistungsfähigkeit von Schaltern konnte bisher nicht nachgewiesen werden, so daß diese Erscheinung auch weiterhin mehr für das Verständnis der Vorgänge als für die unmittelbare Praxis von Bedeutung bleibt.

Unterbrechung kleiner kapazitiver Ströme

Der erste der beiden in dieser Gruppe behandelten Berichte befaßt sich mit der Berechnung der Überspannungen auf Grund der verschiedenen, zu beiden Seiten eines rückzündenden Schalters angeschlossenen Netzteile. Dabei können bei ungünstigen Verhältnissen sehr hohe Überspannungen erwartet werden, wie auch durch Netzversuche nachgewiesen wurde. Der zweite der Berichte untersucht die verschiedenen, zur Vermeidung der Überspannungen möglichen Wege und kommt ebenso wie der erste Bericht zu dem Schluß, daß das wirksamste Verfahren in dem vollständigen Vermeiden der Rückzündungen besteht. Dieses Ziel läßt sich auch bei ölarmen Schaltern durch Mehrfachunterbrechung, hohe Schaltgeschwindigkeit und gegebenenfalls Öleinspritzung erreichen. *De Zoeten* faßte das Ergebnis der Aussprache dahingehend zusammen, daß man dem Ziel der Rückzündungsfreiheit offenbar an allen Stellen schon so nahe gekommen ist, daß das Problem der Überspannungen beim Schalten leerlaufender Leitungen bald der Vergangenheit angehören wird.

Abstandskurzschluß

Wenn der Kurzschluß nicht unmittelbar hinter dem Schalter, sondern erst nach einem Leitungstück von der Größenordnung eines oder mehrerer Kilometer auftritt, so

weist die Einschwingspannung eine sehr hohe Anfangsteilheit, wenn auch verringerter Amplitude auf. Die beiden Berichte dieser Gruppe befassen sich sowohl mit der Theorie des Abstandskurzschlusses als auch mit dem Verhalten der Schalter unter dieser Beanspruchung und den geeigneten Prüfverfahren. Hier ist die Frage von Interesse, ob die Prüfung nur an Leitungen geschehen kann oder auch an Schaltkreisen mit konzentrierten Induktivitäten, Kapazitäten bzw. ohmschen Widerständen. Die theoretische Dreieckskurve der Spannung der Eigenschwingung der homogenen Leitung kann schon durch die Meßeinrichtung zu einer angenäherten Sinusform verändert werden, wie in der Aussprache vorgebrachte Oszillogramme zeigten. Besprochen wurde ferner der mögliche Einfluß des Nachstromes und von Parallelwiderständen auf die hochfrequente Beanspruchung der Schalter beim Abstandskurzschluß. Hier kann auch die beim Nachstrom erwähnte Unterscheidung zwischen elektrischer und thermischer Wiederzündung eine wesentliche Rolle spielen. Der mögliche Einfluß der verschiedenen Art der zum Schalter parallel liegenden Kapazität, ob konzentriert oder verteilt, kann bei der Prüfung und im Netz am besten dadurch ausgeglichen werden, daß in die Schalter genügend große Parallelkapazitäten eingebaut werden.

Löschmittel

Großes Interesse erweckte der amerikanische Bericht über die Verwendung von Schwefelhexafluorid als Löschmittel. Die darin angegebene Begründung der guten Löschfähigkeit fand jedoch nicht allgemeine Zustimmung, da die in Betracht kommenden Werte von Sauerstoff ähnlich sind wie bei Schwefelhexafluorid, ohne daß die gleiche Löschfähigkeit in Sauerstoff wie in Schwefelhexafluorid erzielt werden kann. Wesentlich scheint zu sein, daß in Schwefelhexafluorid die Lichtbogendurchmesser beträchtlich kleiner als in Luft sind. Ein Schalter für 132 kV Spannung mit Schwefelhexafluorid als Löschmittel befindet sich in Erprobung.

Im letzten Kapitel eines umfangreichen französischen Gemeinschaftsberichtes werden die möglichen Leistungssteigerungen der Druckluftschalter durch Anwendung von extrem hohen Drücken untersucht. Messungen an einer Versuchsanordnung mit Drücken bis 80 at hatten vielversprechende Ergebnisse gezeigt.

Schalterprüfung

Vier von den in dieser Gruppe besprochenen Berichten weisen auf interessante Einzelheiten hin über die Durchführung von Schalterprüfungen sowohl in Kurzschlußprüfungen, wie z.B. in *Bjehovic* (ČSR) und im Netz der *Bonneville Power Administration*. Sie lassen auch erkennen, welche Einrichtungen und welche Organisation für Hochleistungsversuche notwendig sind. Die Übertragung von mechanischen Meßwerten, wie Druck oder Temperatur von den auf Hochspannungspotential befindlichen Teilen auf Erdpotential kann große Schwierigkeiten bereiten. An die bereits bekannten Übertragungen mit Hochfrequenz schließt sich nun ein optisches Übertragungsverfahren an.

Die restlichen zwei Berichte dieser Gruppe berichten von Meßverfahren, die nicht ganz zu recht als synthetische Prüfverfahren bezeichnet werden. Das eine bezieht sich auf die Feststellung des rückzündungsfreien Schaltens von kleinen kapazitiven Strömen, das zweite ist eine Erweiterung der bekannten Bestimmung der Leerlaufkennlinie nach dem Sägezahnverfahren, um den Verlauf der elektrischen Festigkeit nach der Unterbrechung großer Ströme zu messen. In der Aussprache wurde der Wert solcher Meßverfahren anerkannt, aber auch auf den Unterschied zu den syntheti-

*) Prof. Dr. techn. A. Hochrainer ist technischer Direktor der Hochspannungsschaltgeräte-Fabrik und des Hochspannungsinstitutes der AEG in Kassel.

schen Prüfungen hingewiesen. Außer der Weil-Dobke-Schaltung, die nunmehr auch für mehrere Halbwellen angewendet werden kann, stehen noch andere echte synthetische Verfahren zur Verfügung.

Studienkomitee 3

Wie üblich, lag auch ein Bericht des von *H. Schiller* geleiteten Studienkomitees vor. Außer den in der allgemeinen Diskussion behandelten Fragen wurde in der Aussprache noch auf die Bedeutung des Vierparameterverfahrens hin-

gewiesen, das sich zur Beschreibung der Einschwingspannungen, besonders auch für den Abstandskurzschluß allgemein einführen dürfte. Der Bericht enthält einen Anhang über Prüfverfahren unter Verwendung des Vierparameterverfahrens. Auf dieser Grundlage wird auch die Arbeitsgruppe des Studienkomitees, die sich mit den Untersuchungen zur Normung der Einschwingspannungen beschäftigt, seine Arbeiten fortführen. Das Studienkomitee beachtet auch alle mit den indirekten und besonders den synthetischen Prüfungen zusammenhängenden Fragen.

Kabel

Von **Gerd Buß**, Köln-Mülheim*)

DK 061.3(44),1960" : 621.315.2

Die zwölf Fachberichte sowie der Bericht des Vorsitzenden Prof. *van Staveren* über die Arbeiten des Studienkomitees wurden auf Vorschlag des Gruppenberichterstatters *Brazier*, behandelten Problemen entsprechend, in den folgenden sieben Gruppen zur Aussprache gestellt.

Seekabel

Der umfassende Bericht von *Sallard, Tellier, Cherry* und *Barnes*, der die geplante Energieübertragung mit hoher Gleichspannung zwischen England und Frankreich behandelt und daher auch in der Gruppe 43 (Gleichstrom) besprochen wurde, beschäftigt sich sehr eingehend mit allen kabeltechnischen Fragen. Für die Auswahl der Kabelart sind nicht nur die elektrischen Anforderungen, sondern auch die besonderen Betriebsbedingungen maßgebend, die sich aus der großen Länge und der Wassertiefe ergeben. Im übrigen werden der innere und der äußere Aufbau des Kabels weitgehend von den mechanischen Beanspruchungen bestimmt, die ein solches Kabel bei Ein- und Umschließvorgängen während der Fertigung, beim Einbringen ins Schiff sowie vor allem beim Legen und bei einer Instandsetzung aushalten muß.

Keine der bekannten Kabelbauarten wurde als in allen Punkten befriedigend angesehen. Bei Benutzung der normalen Ölkabelkonstruktion ist die Ölversorgung für so große Längen nicht möglich, während das Flachkabel, das an den Enden keine Ölvorratsbehälter benötigt, sich nicht für große Wassertiefen eignet. Das Gasinnendruckkabel hat zwar den Vorteil, daß es mit vorgetränkten Isolierpapieren in sehr großen Längen gefertigt werden kann, bringt aber durch seine Gasräume, vor allem unter hohem Wasserdruck, bei einer Beschädigung die Gefahr des Wassereintritts auf längere Strecken mit sich. Man war der Auffassung, daß das einfache Massekabel heute noch die beste Lösung darstellt, wobei allerdings die zulässige elektrische Beanspruchung der Isolierung die Übertragungsspannung auf einen Höchstwert von 300 kV begrenzt.

Mit einer thermoplastischen Isolierung kann ein ideales Seekabel geschaffen werden, wenn durch die noch notwendigen Entwicklungsarbeiten erreicht wird, daß so dicke Isolierungen hohlraumfrei in großer Länge auf die Adern aufgebracht und widerstandsfähige Verbindungsstellen auf See hergestellt werden können.

Von einer Kreuzung des Oslofjords auf 1750 m Länge und Wassertiefen bis zu 220 m mit zwei 300-kV-Drehstromsystemen aus Einleiter-Ölkabeln haben *Hirsch* und *Qvigstad* Einzelheiten über das Planen, Fertigen und Legen berichtet. Die Kabel mit 400 mm² Leiterquerschnitt, 21,5 mm Isolierungsdicke und einem Außendurchmesser von 113 mm waren für die Trasse jeweils in einer Länge hergestellt worden.

Künstliche Kühlung der Kabel

Über die Wirksamkeit einer künstlichen Kühlung von Kabeln lagen vier Berichte vor, in denen durch Rechnung und experimentelle Untersuchungen sowie auf Grund von praktischen Erfahrungen nachgewiesen wird, daß auf diese Weise die Belastbarkeit der Kabel bis zu 50 % gegenüber den normalen Werten erhöht werden kann.

Die Aussprache zeigte aber, wie schwer sich die Frage entscheiden läßt, wann die Anwendung einer solchen Maßnahme technisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar ist.

Es bestand kein Zweifel darüber, daß sich eine künstliche Kühlung immer dann als gerechtfertigt erweisen wird, wenn entweder bei kurzen Kabelstrecken Wärmestauungen zu erwarten oder bei längeren Kabelstrecken örtlich begrenzte Stellen mit thermisch ungünstigen Bedingungen nicht zu umgehen sind.

Ein Beispiel für den zuerst genannten Fall bringt der Bericht von *Giaro* über die erfolgreiche Belüftung eines Kanals mit einer größeren Anzahl von Kabeln. In guter Übereinstimmung von Rechnung und Messung ist eine wesentlich höhere Belastbarkeit der Kabel erreicht worden. *Mochlinski* zeigte, daß auf dem Gelände einer Schaltstation eine Wasserkühlung für die verhältnismäßig kurzen Kabelstrecken wirksam durchgeführt und die Austrocknung des Erdreichs verhindert werden konnte.

Mit der Notwendigkeit einer örtlich begrenzten Kühlung an längeren Kabelstrecken wird man in zunehmendem Maße auch bei Höchstspannungskabeln rechnen müssen, nachdem diese mehr und mehr in Stadtgebieten und auf Industriegelände verlegt werden, wo durch den Ausbau der übrigen Kabelnetze und der Fernheizungsanlagen zusätzliche Wärmequellen entstehen. Dem Bericht von *Ralston* und *West* ist zu entnehmen, daß man bei einer 115-kV-Ölkabelanlage durch eine Kühlung auf etwa 100 m Länge vermeiden konnte, die Belastbarkeit des ganzen Kabels auf 80 % seiner Nennlast herabsetzen zu müssen. Auf diesem Stück der Trasse, für das sich nach einer Umlegung des Kabels ein wesentlich höherer äußerer Wärmewiderstand ergeben hatte, wurden parallel zu den Kabeln von Wasser durchflossene Kunststoffrohre verlegt.

Eine künstliche Kühlung ganzer Kabelstrecken kann man in Erwägung ziehen, einmal um mit den in herkömmlicher Weise isolierten Kabeln bei extrem hoher Spannung die Übertragung großer Leistungen zu ermöglichen, andererseits aber auch um die Kabelkosten herabzusetzen.

Eine sogenannte innere Kühlung durch Umwälzen des Isolieröles, wie sie von *Oudin* an einem 500-kV-Kabel erprobt wird, läßt sich wohl nur an verhältnismäßig kurzen Kabelstrecken wirkungsvoll durchführen. *Sutton* und *Morgan* untersuchten die Möglichkeit, Stahlrohr-Kabel dadurch zu kühlen, daß Gas, Öl oder Wasser innerhalb der Rohrleitung und über äußere Wärmeaustauscher umgepumpt wird.

*) Dr. phil. G. Buß ist Leiter der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik der Felten & Guilleaume Carlswerk AG, Köln-Mülheim.

In der Aussprache ergaben sich gegen die künstliche Kühlung der ganzen Kabelstrecke Bedenken, die vorwiegend die Wirtschaftlichkeit der Verfahren betrafen. Von verschiedenen Seiten wurde geltend gemacht, daß es wirtschaftlicher sein dürfte, einmalig höhere Kabelkosten aufzuwenden, als ständig die Verluste und die Kühlung kapitalisieren zu müssen. Da es sicher richtiger ist, die Verlustwärme gar nicht erst entstehen zu lassen, als sie durch kostspielige Kühlanlagen wieder abzuführen, sollte das Bestreben weiter dahin gehen, die Verluste der Kabel so niedrig wie möglich zu halten und dabei dem Einfluß jedes Aufbauelementes Beachtung zu schenken.

Im Verlauf dieser Aussprache wurde auch die Frage sehr eingehend erörtert, bei welchen Übertragungsleistungen das Nieder- oder das Hochdruck-Ölkabel die zweckmäßigere Lösung darstellt. Mehrere Sprecher stimmten der von *Oudin* angegebenen Abgrenzung nicht zu und waren der Meinung, daß für die gleiche Übertragungsleistung das Niederdruck-Ölkabel keinen nennenswert größeren Außendurchmesser hat, aber dem Hochdruck-Ölkabel gegenüber kleinere Verluste und geringere Montagekosten verursacht.

Kabel-Legungsarten

Beim Legen und Einbauen des 230-kV-Ölkabels für den St.-Lorenz-Seeweg und des 330-kV-Ölkabels für das Kraftwerk Kariba wurden Verfahren angewendet, die für die Behandlung so dicker und schwerer Kabel von allgemeiner Bedeutung sind. Wie *Banks* und *Wollaston* berichtet haben, sind die Kabel in den waagerechten und senkrechten Schächten in Wellenlinien verlegt und durch entsprechend angebrachte Schellen in dieser Form gehalten. Auf diese Weise werden die Längenänderungen der Kabel unter Lastwechseln so gelenkt, daß keine schädlichen Biegebeanspruchungen auftreten. Umfangreiche Versuche haben die Bedingungen geklärt, unter denen es möglich ist, Kabelnängen von 600 m in „ducts“ einzuziehen, und wie die „manholes“ zu bemessen sind, damit die Längenänderungen darin einwandfrei aufgenommen werden. Diese Untersuchungen fanden vor allem das Interesse der Amerikaner, da sie diese Legungsart vorwiegend anwenden.

Zu dem Erfahrungsaustausch über die in den einzelnen Ländern gebräuchlichen Legungsarten, der vom Kabel-Studienkomitee angestrebt wird, lieferte *Kitagawa* einen Beitrag für Japan. Er berichtet über Verfahren, die in Sonderfällen angewendet wurden, und über die Erfahrungen, die man dabei gewonnen hat.

Einen interessanten Einblick in die historische Entwicklung der Ölkabel-Sperrmuffen haben *Gazzana Priaroggia* und *Palmieri* gegeben. Sie zeigten, wie die Abmessungen der Sperrmuffen für 230 kV und 400 kV Betriebsspannung durch konstruktive Maßnahmen und durch die Verwendung von Epoxydharz herabgesetzt werden können.

Erfahrungen mit Aluminiummänteln

Das geringe Gewicht, die Druckfestigkeit und die gute Biegsamkeit des gewellten Aluminiummantels bieten gegenüber dem Bleimantel Vorteile, die auch bei Höchstspannungskabeln mit großen Außendurchmessern erfolgreich genutzt werden können. Als 110-kV-Dreileiter-Ölkabel mit gewelltem Aluminiummantel hat man diesen neuen Kabeltyp 1957 in Deutschland erstmalig in Betrieb genommen und verwendet ihn seither in zunehmendem Maße.

Über die experimentellen Grundlagen des Kabelaufbaus, die Ausführung der Muffen und Endverschlüsse sowie über die erstellten Anlagen haben *Lücking* und *Ochel* berichtet. Für eine gleichartige Entwicklung in England nannte *Hollingsworth* geringere Mantelwanddicken. Diese mögen zwar für die betriebliche Beanspruchung ausreichen, doch wollte

man hier dem unbewehrten Kabel durch den etwas dickeren Mantel einen zusätzlichen mechanischen Schutz geben. Für die Verbindung des Aluminiummantels mit den Gehäusen der Muffen und Endverschlüsse haben sich bei Niederdruck Schmierplomben bewährt. Bei Innendrücken über 6 bis 7 at sieht die englische Ausführung eine Bandage aus Glasgewebe und Gießharz über der Schmierplombe vor, während die jüngste deutsche Entwicklung zu einer Flanschverbindung übergeht.

Kabelisolierung aus Kunststoffolien

Die vorangegangene Aussprache über die Möglichkeit, die Übertragungsleistung der Kabel durch künstliche Kühlung zu erhöhen, hatte schon die Frage nach einem Dielektrikum mit geringeren Verlusten aufgeworfen. Noch bedeutungsvoller wird dieses Problem aber, wenn für Energieübertragungen mit Drehstrom Spannungen über 400 kV in Betracht gezogen werden. Man versucht daher an verschiedenen Stellen, die hohe Durchschlagsfestigkeit und die geringen Verluste gewisser Kunststoffolien beim Aufbau eines neuartigen Kabeldielektrikums nutzbar zu machen.

De Vos und *Vermeer* haben ihre weiteren Untersuchungen auf die Stoßspannungsfestigkeit von Kabelmodellen mit ölfülltem Kunststoffdielektrikum ausgedehnt. Die erzielten Durchschlagswerte übersteigen die einer hochwertigen Öl-Papier-Isolierung nicht in dem erwarteten Maße, weil die Stoßfugen als schwache Stellen wirken. Die Versuche bestätigten, daß der Durchschlagsmechanismus in noch nicht genügend geklärter Weise außer von den elektrischen auch von anderen physikalischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten des so zusammengesetzten Dielektrikums abhängt. Im übrigen liegen aber keine geeigneten Stoffe vor, mit denen diese Probleme erfolversprechend gelöst werden können.

Das Ergebnis der Aussprache läßt sich folgendermaßen zusammenfassen. Es gibt heute noch keine Kunststoffolie, die von Öl nicht angegriffen wird und in diesem zusammengesetzten Dielektrikum elektrische, thermische und mechanische Eigenschaften aufweist, wie sie von einer Kabelisolierung für höchste Spannungen gefordert werden müssen. Hier liegt für die chemische Industrie eine Entwicklungsaufgabe von weittragender Bedeutung vor.

Wärmewiderstand des Erdreichs

Bei der Berechnung der Kabelbelastbarkeit werden in den einzelnen Ländern für den spezifischen Wärmewiderstand des Erdreichs Werte von 70 bis 120 $\text{grd} \cdot \text{cm}/\text{W}$ verwendet. Im Hinblick auf die wirtschaftliche Bedeutung, die der richtigen Ausnutzung der Kabel zukommt, haben englische Kabelfachleute sehr eingehende und umfassende Untersuchungen durchgeführt und bei 551 Messungen gefunden, daß 80 % der Werte zwischen 45 und 130 $\text{grd} \cdot \text{cm}/\text{W}$ liegen. Man wird eine Kabelanlage nur dann den Wärmeableitungsverhältnissen entsprechend richtig belasten können, wenn man den Wärmewiderstand des Erdreichs der ganzen Trasse entlang ermittelt hat. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß sich nachträgliche Änderungen durch die verwendeten Bettungswerkstoffe, mit der Jahreszeit und infolge Austrocknung des Erdreichs ergeben können.

Wie die Aussprache zeigte, werden auch in anderen Ländern die angegebenen Verfahren, den spezifischen Wärmewiderstand zu messen, die Bodenproben zu entnehmen, den Feuchtigkeitsgehalt zu bestimmen und die Bodensorten zu klassifizieren, noch studiert. Man war sich aber darüber einig, daß es sehr schwierig ist, eine wechselnde Bodenfeuchtigkeit oder eine zunehmende Austrocknung in ihrem maßgebenden Einfluß richtig zu berücksichtigen.

Arbeiten des Studienkomitees

Das Studienkomitee hat Empfehlungen für die Durchführung von Stoßspannungsprüfungen an Kabeln sowie für die Prüfung von Massekabeln zur Gleichspannungsübertragung ausgearbeitet und diese zur Aussprache vorgelegt. Eine Arbeitsgruppe studiert die in den einzelnen Ländern gebräuchlichen Rechenverfahren für die Belastbarkeit von Kabeln mit dem Ziel, einheitliche Richtlinien zu gewinnen.

Im übrigen arbeitet das Studienkomitee im Auftrage des IEC-Komitees 20 an einem Prüfverfahren für den Korrosionsschutz von Kabeln und führt eine vergleichende Betrachtung über die in den verschiedenen Ländern üblichen Legungsverfahren durch. Einen Beitrag zu diesem Erfahrungsaustausch lieferte *Komives* für die USA, der auch über die dort geplanten Prüfungen an 345- bis 400-kV-Kabeln berichtete.

Freileitungen

Von **Heinz Mors**, Mannheim *)

DK 061.3(44), 1960 : 621.315.1

Leitungen, Leiterseile und Schwingungen

In dem Gruppenbericht von *Maggi* sind die aktuellen Fragen, und zwar „Every day stress“, „Sicherheitsfaktoren“, „Einzelseile“ und „Bündelleiter“, „Belastungsbedingungen“, „Klemmen“ und „Verbinder“ aufgezeigt.

Als „Every day stress“ (abgekürzt EDS) wird eine zulässige Seilbeanspruchung bezeichnet, die bei einer bestimmten mittleren Temperatur, die den Regelfall darstellen soll, vorhanden ist. Übersteigt die EDS diesen Wert, so verursachen die Seilschwingungen infolge Windeinwirkung Schäden an den Leiterseilen. Mit den verschiedenartigen Einflüssen, die hier zu berücksichtigen sind, befassen sich die Berichte von *Vinjar*, über Untersuchungen an Hängesklemmen, weiter der Bericht von *Zetterholm* über die Arbeit des Studienkomitees 6, dann der Bericht von *Bovallius*, *Persson* und *Sandström* über Schwingungsschäden an Leiterseilen und Erdseilen in einigen schwedischen Freileitungen und schließlich der Bericht von *Caillez* und *Tilloy* über Entwicklungsrichtungen im Entwurf und der Erstellung der französischen Freileitungen und die Verminderung der Sicherheitsfaktoren und Einsparungsmaßnahmen, die dabei erzielt werden konnten.

Als Grundlage zur Behandlung der EDS hatte ein Arbeitsausschuß einen umfangreichen Bericht ausgearbeitet. Darin sind die Antworten aus vielen Ländern enthalten, die über Art und Umfang von Schwingungsschäden und über den Wert der EDS für Leiterseile mit und ohne Schwingungsschutteinrichtungen Auskunft geben.

Simpson, der diesem Arbeitsausschuß angehört, erklärte zu Beginn der Aussprache, welche Schwierigkeiten sich bei der Zusammenstellung dieses Berichtes und bei Durchführung der Versuche ergaben und wie verschiedenartige Einflüsse sich auf die EDS auswirken. Er regte an, daß zusätzliche Versuchsanlagen gebaut werden sollten. Auch *Nicholls* war dieser Ansicht und forderte, daß möglichst genaue EDS-Werte ermittelt werden sollen. Dabei wies er noch auf den Einfluß des Geländes hin, durch das die Leitungen verlaufen. *Björgerd* befaßte sich mit dem Einfluß, den die Art der Mastkonstruktion auf die Schwingungen ausüben kann und forderte vor allem einheitliche Versuchungsverfahren, damit die Meßergebnisse koordiniert und einwandfrei beurteilt werden können. *Cabanes* wies auf die neuen Probleme hin, die sich aus der Anwendung der Bündelleiter für Höchstspannungsanlagen ergeben. *Wolf* erklärte eingehend Meßvorrichtungen, die sich nach seiner Ansicht gut bewährt haben. *Bückner* erwähnte den Einfluß der Spannweite, der in den bisherigen Untersuchungen nicht genügend berücksichtigt worden sei und nach theoretischen Überlegungen sich anders auswirke, als aus dem Bericht des Arbeitsausschusses hervorgeht. *Atterberg* schilderte einige Schäden an schwedischen Freileitungen und kam auf Werte der EDS, die etwas unter den vom Arbeitsausschuß empfohlenen maximalen Werten für Stahl-Aluminium-Seile von 18 % der Bruchlast der Seile ohne Schwingungsschutteinrichtung

und von 24 % der Bruchlast der Seile mit Schwingungsdämpfern liegen.

Mit der Ermittlung der erforderlichen Sicherheitsfaktoren der Freileitungen befaßt sich der Bericht von *Constantinescu* und *Borza*. In der Aussprache wies *Simpson* auf die Einsparungen hin, die nach Berichten von *Caillez* und *Tilloy* für französische Verhältnisse gefunden wurden. In diesem Bericht wird die Entwicklung, die zu einer Verminderung der Sicherheitsfaktoren führte, folgerichtig aufgezeigt. *Paris* vertrat in der Aussprache die Ansicht, daß dieses Problem möglichst umfassend betrachtet werden müsse. Mitbestimmend seien Faktoren, wie Betongüte und Werkstoffeigenschaften der Maste, Isolatoren und Leiterseile. *Cabanes* stimmte dieser Ansicht zu, nämlich, daß man bei einer Ermittlung der erforderlichen Sicherheitsgrade wirklich alle Einflüsse erfassen müsse.

Die Fragen, die sich im Zusammenhang mit der Verwendung der Bündelleiter ergeben, sind so vielfältig, daß in dem Gruppenbericht nur ganz bestimmte Fragen herausgegriffen wurden. Zur Belastungsannahme bei Seilbruch ist der Bericht von *Paris*, der hierzu Modellversuche eingehend schilderte, heranzuziehen. Nach Ansicht von *Maggi* muß aber gefragt werden, ob Leiterseilbrüche in einem Bündel überhaupt vorkommen. Wenn ja, muß gefragt werden, mit welcher Häufigkeit sie auftreten. Schließlich ist zu prüfen, ob eine derartige Untersuchung mit Modellversuchen zweckmäßig ist.

Zur Frage der Wind- und Eisbelastungsannahmen für die verschiedenen Bündelleiterarten und Einzelseile sind die Berichte von *Takei*, *Hayashi* und *Sato* über die mechanischen Eigenschaften der Bündelleiter und Seilzugmethoden, weiter der Bericht von *Leibfried* und *Mors* über das mechanische Verhalten verschiedener Bündelleiter im Vergleich zu Einzelseilen nach Ergebnissen auf der Versuchsanlage Hornisgrunde, dann der Bericht von *Birjulin*, von *Burgsdorf* und *Markhlin* über Windbelastung der Freileitungen und schließlich der bereits erwähnte Bericht von *Caillez* und *Tilloy* heranzuziehen.

In der Aussprache erklärte *Maggi*, daß man vor allem praktische Erfahrungen im Betrieb der Leitungen sammeln müsse. Wenn man auf Versuchsergebnisse zurückgreifen will, solle man sich darüber klar werden, ob die Versuchsbedingungen richtig erfaßt sind. Nach Möglichkeit sollte man die Meßverfahren und die Auswertung vereinheitlichen, um die Versuchsergebnisse vergleichen zu können. Nach Hinweisen von *Jasicki* und *Yoda* auf elektrische Versuche in Polen und auf weitere Versuche in Japan, wies *Lafont* auf Erfahrungen mit Abstandhaltern hin, und zwar bei Kurzschluß- und bei mechanischen Versuchen. *Vögeli* erklärte eine Abstandhalterkonstruktion für Zweierbündelleiter mit Anordnung der Klemmen im Dreieck, die sich in den letzten vier bis fünf Jahren auch unter schwersten Eislastverhältnissen in der Schweiz bewährt hat. *White* erwähnte eine kanadische Abstandhalterkonstruktion mit Spiralfeder Verbindung zwischen den Klemmen. *Mors* schilderte neue Versuchs-

*) Dr.-Ing. H. Mors ist Oberingenieur der Brown, Boveri & Cie. AG, Abtlg. Leitungsbau, Mannheim.

ergebnisse auf der Versuchsanlage Hornisgrinde, wo inzwischen zu einem Einzelseil und horizontalen Zweierbündel ein Viererbündelleiter verlegt wurde. Einzelseil und Teilleiter haben gleichen Querschnitt. Danach sind die Ausschwingwinkel und die Eislasten, wenn man beim Vergleich Einzelseil und Teilleiter betrachtet, für das Viererbündel geringer als für das Zweierbündel und noch geringer als für das Einzelseil.

Es zeigte sich, daß über die Eisbelastung der Bündelleiter unterschiedliche Anschauungen bestehen, offenbar dadurch verursacht, daß für nicht allzu schwere Eislastverhältnisse die Bündelleiter verhältnismäßig weniger vereisen und sich demnach günstiger verhalten als Einzelseile, während in Gebieten mit außerordentlich schweren Zusatzlasten die Bündelleiter sich ungünstiger verhalten. *Mjelstad* wies auf große Eisbelastungen in Norwegen hin, die Raumgewichte von 0,75 bis 0,9 kg/dm³ erreichten, während in anderen Ländern wesentlich geringere Raumgewichte festgestellt wurden.

Auch die Ansichten über die Windbelastung der Bündelleiter sind geteilt, da man nicht überall einen Abschirmeffekt des vorderen Teilleiters bei Zweierbündeln gelten lassen will. Mit einem solchen Abschirmeffekt, der eine entsprechende Verminderung der Windbelastungsannahmen bedeutet, ist man beim Viererbündel eher einverstanden.

Maggi hatte in seinem Gruppenbericht eine internationale Vereinheitlichung für die Durchhangbestimmung und Berechnung der Seilbeanspruchungen vorgeschlagen. Außerdem stellte er die Frage nach dem wirtschaftlichen Verhältnis Aluminium zu Stahl in Stahl-Aluminium-Seilen. Schließlich interessiert das Kriechen der Stahl-Aluminium-Seile und der Aluminiumseile, ebenso das Verhalten von Stahlseilen nach der Verzinkung. Zu diesen Fragen sind die Berichte von *Zetterholm* über die Arbeiten des Studienkomitees 6 und der oben erwähnte Bericht von *Caillez* und *Tilloy* heranzuziehen.

Abetti wies in der Aussprache darauf hin, daß in den USA Versuche mit Einzelseilen für 400-kV-Übertragung sowie Zweier- und Viererbündeln für 650-kV-Übertragung durchgeführt wurden. Als Einzelseil und als Teilleiter für das Zweierbündel wurden Seile, die künstlich im Durchmesser vergrößert waren, untersucht. Auch *Röhmann* und *Paris* wiesen auf derartige Seilkonstruktionen hin. *Cabanes* vertrat die Ansicht, daß Einzelseile eigentlich grundsätzlich vorzuziehen seien, da sich in mechanischer Hinsicht hierfür verschiedene Vorteile ergeben. Dabei wird vorausgesetzt, daß das Einzelseil in elektrischer Beziehung genügt.

Dasseto gab für Aluminium-, Stahl-Aluminium- und Al-drey-Seile aufschlußreiche Werte über das Kriechen bei verschiedenen Temperaturen. *Vidmar* legte in einem kurzen Vortrag dar, daß Aluminiumseile nach seiner Ansicht zweckmäßiger und wirtschaftlicher seien als Stahl-Aluminium-Seile.

Mit dem Verhalten der Klemmen und Verbinder befaßt sich der Bericht von *Dienne* und *Determe*, der Ergebnisse bei Kurzschlußversuchen an Stahl-Aluminium-Seilen wiedergibt, außerdem der Bericht von *Furkert*, *Gärtner* und *Grabe* über die Feststellung von schadhafte Verbindern mit Hilfe eines Infrarotdetektors. *Maggi* bemerkte, daß noch Angaben über thermische Einflüsse auf Klemmen und Verbinder in allgemeinerer Form fehlen. *Vinjar* wies in der Aussprache darauf hin, daß neuerdings Brüche infolge Korrosion und gleichzeitig Erwärmung aufgetreten seien, die teils auf schlechte Montage, teils auf schlechte Werkstoffe zurückzuführen seien. Er schilderte Versuche mit Geräten zum Messen des Widerstandes in der Leitung. Nach seiner Ansicht ist ein solches Messen unter Spannung nur wenig komplizierter als am spannungslosen Leiter. *Furkert* wies auf die von ihm entwickelten Meßverfahren hin und bemerkte, daß nach seiner Ansicht gute Klemmen etwa 15 Jahre und mehr halten. Er empfiehlt in jedem Fall Messungen in halb- bis ganzjährigen Abständen. *Feintuch* be-

schrrieb ein Gerät zum Aufheizen der Verbinder und für Kontrollmessungen. *George* wies auf die hohen Kurzschlußleistungen der Höchstspannungsanlagen hin und sprach sich für zusätzliche Verstärkung der Leiter an den Klemm- und Verbindungsstellen aus. *Haro* schilderte finnische Klemmenkonstruktionen und erwähnte, daß in Finnland „armor rods“ nur für Stahl-Aluminium-Leiter großen Durchmessers eingebaut werden. Er betonte die Notwendigkeit, gute Werkstoffe für die Klemmen zu verwenden und gute Arbeitskräfte für die Montage einzusetzen.

White erklärte, daß für 300-kV-Leitungen in Kanada ein Leiter verwendet wird, der einen Durchmesser von 66 mm und eine so hohe Zugfestigkeit hat, daß Eislasten bis 20 kg/m ohne jeden Schaden gehalten werden konnten. *Dasseto* gab aufschlußreiche Ergebnisse über die Auswirkung langzeitiger Erwärmung von Leiterseilen und über Kurzschlußprüfungen.

Peterson warf die Frage auf, wie hoch die Seilzugkosten für Bündelleiter im Vergleich zu Einzelseilen anzusetzen sind. Nach seiner Ansicht fallen diese Kosten bei zweckmäßiger Auswahl der Seilzuggeräte etwa gleich aus, vor allem dann, wenn man — wie in den USA manchmal üblich — zu bestehenden Leiterseilen einen neuen Teilleiter hinzuverlegt. *Dey* erwähnte ein neues System, das für den Seilzug entwickelt wurde und sich gut bewährt haben soll.

Maste und Gründungen

Für diese Gruppe hatte *Avril* einen Bericht ausgearbeitet, in dem Fragen über Verwendungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit der Fundamente aus Betonfertigteilen und vorgefertigten Stahlbeton-Pfählen gestellt werden. Außerdem wird auf den Einfluß der Mastbelastung — vor allem der Mastschwingungen, die auf die Gründung übertragen werden — hingewiesen. Schließlich stellte er noch die Frage nach einer zweckmäßigen Einbringung der Pfähle. Im nächsten Teil seines Berichtes wird die Wirtschaftlichkeit der Rohrmastkonstruktionen kritisch betrachtet. Danach wird auf allgemeine Entwicklungsrichtungen hingewiesen, beispielsweise die Verwendung von dünnwandigen Profilen und Stahl höherer Festigkeit. Zum Abschluß stellte er die Frage, ob die Entwicklung zu noch geringeren Mastgewichten und sonstigen Einsparungen nicht zu einer bedenklichen Abnahme der Sicherheit führen könne.

Mit Fundamenten und Betonfertigteilen befaßt sich der Bericht von *Haro* und *Orivuori*. In dem Bericht von *Zmudzinski* sind polnische Versuche mit vorgefertigten Pfählen, die für Holzmastleitungen verwendet werden, geschildert. Der Bericht von *Gloyer* und *Vogelsang* beschreibt neuere Gründungsarten für Freileitungen.

Während *Haro* und *White* sich in der Aussprache auf günstige Erfahrungen mit Fundamenten aus Betonfertigteilen beriefen, gab *Lennon* zu bedenken, daß der Baugrund durch solche Gründungen verhältnismäßig stark gestört wird, so daß die Tragkraft darunter leidet. *Utruy* bemerkte noch, daß der Bodenaushub sehr sorgfältig vorgenommen werden muß, weil die Fundamentsohle auf dem Baugrund satt aufsitzen soll. *Fischer* erklärte Bohrpfähle, mit denen gute Versuchsergebnisse erzielt wurden. Außerdem besprach er eine Kombination aus vorgefertigtem Stiel mit an Ort und Stelle hergestellter Fußplatte. *Mors* erklärte an Hand von Lichtbildern in Deutschland bewährte Ausführungen der Einsetzfundamente, bei deren Montage — im Gegensatz zu der Stellungnahme des Gruppenberichters — weniger Flurschäden verursacht werden als bei der Erstellung normaler Fundamente. Außerdem zeigte er in einem Farb-Ton-Film die Montage der Einsetzfundamente und die Herstellung der Bohrfundamente.

Sevastianov gab einen sehr interessanten Bericht über vorgefertigte Pfähle. Danach versucht man in Rußland, die Verbindung der Pfähle mit dem Baugrund beim Einpressen durch Rüttelwirkung zu verbessern. Die Pfähle haben eine

Kantenlänge von 22 bis 30 cm und sind 16 bis 33 m lang. Die Einsparungen sollen bei armiertem Beton 32 %, bei Stahl 53,5 %, im Werkstoffpreis 28 % und in den Gesamtherstellkosten 8 % ausmachen. Im Film wurde eine solche Gründung vorgeführt. *Abetti* wies darauf hin, daß mit Sprengstoffen in bestimmten Bodenarten Fundamente wirtschaftlicher hergestellt werden können. *Barraud* und *Vandepierre* trugen Ergebnisse von Modellversuchen vor, außerdem eine theoretische Auswertung, mit deren Hilfe eine Gesetzmäßigkeit für das Verhalten der Mastgründungen und ein zutreffendes Bemessungsverfahren gefunden werden soll. *Bianchi* sprach sich dafür aus, daß ein Stahlrostfundament in der Regel die wirtschaftlichste Gründungsart sei. Dieser Meinung war auch *Starr*, der außerdem auf eine vorteilhafte Gründungsart mit Stahlblechplatten aufmerksam machte.

Harvey und *Erskine* hatten einen Bericht über Rohrmaste verfaßt. Darin wird festgestellt, daß derartige Konstruktionen sehr wirtschaftlich sein sollen. *Avril* wies in der Aussprache darauf hin, daß auch architektonische Gesichtspunkte für die Verwendung von Rohrkonstruktionen sprechen. Dagegen stellte *Bianchi* fest, daß nach seinen Erfahrungen Rohrkonstruktionen unzweckmäßig sind. Durch neuartige Winkelstahlmaste könnten aber tatsächliche Einsparungen erzielt werden. *Nock* erklärte, daß Rohrmaste teuer seien, und sprach sich für eine kombinierte Bauweise aus, nämlich Eckstiele aus Winkelstahl und Diagonalen aus Rohren. *Percivall* erwähnte, daß Rohrmastkonstruktionen verhältnismäßig empfindlich seien und Schäden an den Schweißnähten auftreten können, die im Betrieb der Leitung sehr unangenehm sind. *Lister* und *Henley* entgegneten, daß das Schweißen keine besonderen Schwierigkeiten mache und normale Elektroden auch für das Schweißen von verzinktem Stahl verwendet werden können. Sie nannten Einsparungen an Montagezeiten, die beträchtlich waren. Man

gewann den Eindruck, daß trotz der Vorteile, die von den Verfassern des Berichtes auch zahlenmäßig unterbaut wurden, Rohrmastkonstruktionen kritisch zu betrachten sind.

Bückner erwähnte noch, daß Einsparungen an Gründungskosten möglich sind, wenn man die sonst übliche Mastkonstruktion mit nur drei Füßen versieht. *Bianchi* hielt dies nicht für zweckmäßig, und zwar auch mit Rücksicht auf mögliche Fundamentverschiebungen; diese hält er übrigens für ungefährlicher, wenn sie in der Horizontalen verlaufen, als wenn sie in vertikaler Richtung auftreten. *Cabanes* bezeichnete die Darrieux-Maste als beispielhaft, bei denen mit sparsamen Mitteln eine hinreichende Sicherheit erreicht wurde, und regte damit eine weitergehende Entwicklung, sei es zu neuartigen und wirtschaftlicheren Masttypen oder zu einer Verminderung der Sicherheitsgrade, an.

Abschließend sprach man sich über die Zweckmäßigkeit der Mastversuche aus. Vor allem wurde die Frage gestellt, ob Versuche, wie sie üblich sind, einen ausreichenden Aufschluß über die im Betrieb vorhandene Sicherheit geben können. Hierzu stellte *White* fest, daß beispielsweise an der Baustelle geprüfte Mastkonstruktionen unterschiedliche Sicherheiten zeigten, je nachdem, ob sie eine Felsgründung oder Normalgründung erhielten. Dem entgegnete *Bianchi*, daß der Sinn der Versuche auf den Versuchsständen sei, eine Ausgangsbasis für die Beurteilung der Mastkonstruktion zu finden.

Nach Ansicht von *Dey* sollte man die Anwendung von Kunststoffen für den Freileitungsbau vorantreiben. Beispielsweise bieten Traversen aus Kunststoff, falls dieser ein hohes Isoliervermögen hat und billig hergestellt und verarbeitet werden kann, beträchtliche Einsparmöglichkeiten. Dann können die Isolatorenketten entsprechend kürzer bemessen werden.

Isolatoren

Von Gerhard Reverey, Stuttgart*

DK 061.3(44), 1960 : 621.315.62

In der Gruppe Isolatoren wurden folgende Themen behandelt: 1. Verschmutzung, 2. Prüfungen und 3. Verschiedenes.

Verschmutzung

Das Problem der Isolationsminderung durch Verschmutzung wurde erst in den letzten Jahren durch systematische Untersuchungen mit künstlichen Fremdschichten grundlegend geklärt. Nach Deutschland entwickelten auch Frankreich, England und Belgien Fremdschicht-Prüfverfahren, die auf den neuen Erkenntnissen beruhen und sich noch bewähren müssen.

Forrest (England) gab als Leiter einer Arbeitsgruppe des CIGRÉ-Komitees „Isolatoren“ die Ergebnisse einer Versuchsreihe bekannt, die für einige Isolatortypen mit den verschiedenen Prüfverfahren durchgeführt wurde. Von fünf Verfahren haben vier zu den gleichen Ergebnissen geführt.

Auf der CIGRÉ-Tagung 1956 vertrat man noch die Ansicht, daß das Fremdschichtproblem im Laboratorium nur teilweise gelöst werden könne; eine endgültige Beurteilung der Isolatoren sei allein durch Versuche unter den natürlichen Bedingungen des Betriebes möglich. Über Betriebsversuche an Isolatoren bei industrieller Verschmutzung lag ein Bericht von *Reverey* und *Stolte* (Deutschland) vor. Bei diesen Versuchen wird der meßtechnischen Erfassung der Isolationsmindernden Einflüsse besondere Beachtung ge-

schenkt. *Baatz* (Deutschland) begründete ergänzend die Forderungen an die Genauigkeit bei der Messung des Ableitstromes. Die Häufigkeit der Entladestromstöße kann zur vergleichswisen Beurteilung verschiedener Isolatortypen nicht herangezogen werden. Nach den bisherigen Ergebnissen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Laboratoriumsversuchen und der Praxis nachgewiesen. Die vergleichenden Laboratoriumsversuche wurden mit dem von *Reverey* auf der CIGRÉ-Tagung 1956 vorgetragenen Nebel-Prüfverfahren durchgeführt.

Betriebsversuche sind langwierig, da der Isolator erst nach eingetretenem Überschlag beurteilt werden kann. *Reverey* schlug deshalb ein kombiniertes Verfahren vor, bei dem der im Betrieb natürlich verschmutzte Isolator im Laboratorium bei künstlicher Vernebelung bis zum Überschlag geprüft wird. Die Versuchszeit kann dadurch stark gekürzt werden. Das Verfahren der Spannungssteigerung bis zum Überschlag beruht auf dem Prinzip, daß sich bei jedem Spannungswert der ungünstigste Zustand der Spannungsverteilung am Isolator, d. h. der höchste Grad der Isolationsminderung, einstellt.

Über weitere Betriebsversuche hatten *Geszti*, *Ignác* und *Ronkay* (Ungarn) berichtet. In einer Freiluft-Schaltstation mit starker Verunreinigung durch Flugasche konnten die Betriebsverhältnisse durch Verlängern der Isolatorenketten und neu entwickelte Stützer mit Rippen unter den Schirmen (3,3 cm Kriechweglänge je Kilovolt Betriebsspannung) wesentlich verbessert werden. Zur Zeit stärkster Isolationsminderung wird die Anlage zusätzlich abgespritzt. Eine

* Dipl.-Ing. G. Reverey ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen e. V., Nellingen über Eßlingen (Neckar).

andere Station wird durch Schwefel (IV)-oxyd (SO_2)- und Stick (III, V)-oxyd (NO_2)-Gase stark beeinflusst, so daß bei Nebel häufig Überschlüge auftraten. Die Isolatoren schlugen bei ungünstigem Wetter auch kurz nach dem Reinigen über. Erst das Aufstreichen von Silikonfett brachte wirksame Abhilfe. Silikon ist auch bei Flugasche gut, jedoch nicht so wirksam wie bei chemischer Verschmutzung. Das Aufstreichen von Silikon auf die Isolatoren wird zweckmäßig vor Beginn der Nebelperiode durchgeführt. Unter Verwendung von SO_2 und NO_2 in einer Nebelkammer wurden die guten Eigenschaften der wasserabweisenden Silikonüberzüge nachgewiesen. Bis zum Überschlag treten nur geringfügige Entladungen auf, so daß der Silikonanstrich auch bei starker Verschmutzung lange Zeit wirksam ist.

Taylor und Lantz (USA) haben seit 1953 das Verhalten von Silikonüberzügen in sehr verschmutzter Atmosphäre eingehend studiert. Überzüge, die harte Filme bilden, ermöglichen bestenfalls eine Verdopplung der Reinigungsperiode. Silikonpasten, die nicht hart werden, halten ein Jahr und länger. Die Dicke der Silikonschicht ist von Einfluß auf die Dauer der Wirksamkeit.

In der Aussprache wurde von Sprechern verschiedener Länder einmütig über gute Erfahrungen mit Silikonpräparaten berichtet. Als nachteilig wurde das kostspielige Aufbringen und Entfernen der Schicht genannt. Nach Dey (England) haben sich Silikonfette auch in den Tropen (Pakistan) bewährt, wo es in Küstennähe bei starker Sand- und Salzverschmutzung und bei hoher Luftfeuchtigkeit zu häufigen Überschlügen kam. Tinney (England) erzielte bei Salzverschmutzung auch mit billigen Hydrocarbonfetten gute Ergebnisse. Nach Lusignan (USA) hat sich an der kalifornischen Küste, wo das Verschmutzungsproblem sehr schwierig war, Silikon wesentlich besser verhalten als die verschiedensten Arten von Erdölen.

Als weitere Maßnahme gegen die Verschmutzungseinwirkung wurde das periodische Abspritzen der Isolatoren, besonders unter Spannung, empfohlen. Connon (England) berichtete über das erfolgreiche Abspritzen einer 275-kV-Station unter Spannung in der Nähe von Stahlwerken und Kokereien bei Manchester mittels einer fahrbaren Einrichtung. Das Spritzwasser hat einen spezifischen Widerstand von etwa 15 000 Ω cm. Nach Erfahrungen von Csuros (England) im 132-kV-Netz darf der spezifische Wasserwiderstand für ein gefahrloses Abspritzen nicht kleiner als 2000 Ω cm sein. Hse Chen Fong (China) bezeichnete das Abspritzen der Isolatoren besonders bei Salz- und Staubverschmutzung immer noch als das beste Mittel zur Verbesserung ihres Betriebsverhaltens.

Tinney berichtete über Versuche mittels Warmluft zur Erhöhung der Oberflächentemperatur des Isolators. Dabei wird die Salzsäure neutralisiert und die Bildung eines Elektrolyten verhindert.

Nach Angaben von Girardet (Marokko) wurden in Marokko besonders bei Leitungen in Küstennähe mit Ölbadisolatoren neuer Bauform ausgezeichnete Ergebnisse erzielt.

Von verschiedenen Seiten wurde gefordert, die Bauform des Isolators zu verbessern und der Kriechweglänge noch mehr Beachtung zu schenken. In einem Bericht von Gion und Meier (Frankreich) wird das gute Fremdschichtverhalten eines Langstab-Spiralschirmisolators mit neuartiger Schirmform, dessen Schirm wendelförmig auf dem Kern angebracht ist, und großer Kriechweglänge hervorgehoben. Dieser Isolator mit Rillen auf und unter dem Schirm zeigte sich nach dem französischen Prüfverfahren dem Langstabisolator mit Normalschirm und auch der Kappenisolatorenkette überlegen. Ergebnisse aus der Praxis liegen jedoch noch nicht vor. Über systematische Untersuchungen bei natürlicher Verschmutzung an Isolatoren verschiedener Bauform und Kriechweglänge in einer belgischen 150-kV-Versuchsstation in der Nähe einer Zechenanlage berichtete

Ellis (Belgien). Die bisherigen Ergebnisse weisen auf die Bedeutung der Kriechweglänge hin; die Isolatoren mit kleinstem Kriechweg schlugen zuerst über.

Die lebhafte Aussprache über das Verschmutzungsproblem wurde durch zwei interessante Filme ergänzt. Obenaus (Deutschland) zeigte einen an einem Modell aufgenommenen Film, aus dem der Entladungsmechanismus und die Fußpunktwanderung sehr anschaulich hervorgingen. Ein von Forrest (England) gebrachter Film zeigte eine Versuchsstation mit natürlicher Verschmutzung in England und die Anwendung des englischen Prüfverfahrens mit künstlicher Verschmutzung.

Prüfungen

Lieuze (Frankreich) und Hecht (Deutschland) brachten eine Übersicht über die Anwendung der Temperaturwechselprüfung bei großen Porzellanisolatoren in verschiedenen Ländern. Diese Prüfung wird noch nicht einheitlich gehandhabt. Nach den Erfahrungen wurden folgende Vorschläge gemacht. Die Temperaturwechselprüfung bei großen Isolatoren sollte allgemein als Typen- oder Stichprobenprüfung gelten, nur in besonderen Fällen als Stückprüfung. Die Tauchprüfung sollte der Beregnungsprüfung vorgezogen werden. Es ist unnötig, mehr als drei Temperaturwechsel vorzunehmen. Der Temperaturunterschied zwischen den Bädern und die Tauchzeiten sollten vom Volumen und der Wanddicke des Isolators abhängig sein.

Fremineur und Grégoire (Belgien), Lieuze (Frankreich) und Seassaro (Italien) hießen diese Vorschläge im allgemeinen gut. Belgien bevorzugt jedoch die Stückprüfung. Vorschriften für große Isolatoren mit Armaturen festzulegen, wurde als schwierig angesehen; die Arten der Armaturen und der Befestigung sind zu vielfältig.

Zur Frage der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung hatte von Treufels (Deutschland) in einem Bericht einer von ihm geleiteten Arbeitsgruppe Stellung genommen. Dieses Verfahren zum Auffinden von Porosität und anderen Werkstofffehlern wird schon seit sieben Jahren mit gutem Erfolg angewendet. Das später entwickelte Verfahren der Schrägeinschallung hat sich bei der Untersuchung der armierten Konen von Isolatoren der Vollkernbauart bewährt. Auch die Prüfung von Isolatoren in den Leitungen ist mit Hilfe langer Meßkabel möglich.

Haro (Finnland) bezweifelte nach eigenen Untersuchungen in einem Zusatzbericht die Leistungsfähigkeit der Ultraschallprüfung. In der Aussprache machte er auf Grund neuerer Erfahrungen jedoch Zugeständnisse. Die Prüfung der Isolatoren im Betrieb hat in Finnland keine wirtschaftliche Bedeutung; sie ist nur bei Kreuzungen von Eisenbahnen, Straßen und Leitungen gerechtfertigt. Kjolby (Dänemark) wies auf die Wichtigkeit der Ultraschallprüfung bei armierten Isolatoren hin.

Aus dem von Taylor und Lantz (USA) eingereichten Bericht ging die Bedeutung der Stoßspannungsprüfung mit steilen Wellen hervor. Für die Steilheit der Stirn wurde 1000 kV/ μ s vorgeschlagen. Palva (Finnland) unterstrich den Wert dieser auch in Finnland für Freileitungsisolatoren vorgeschriebenen Prüfung. Nach seinen Erfahrungen gibt die alternativ anwendbare Durchschlagsprüfung mit Wechselspannung unter Öl kein richtiges Bild über das Verhalten des Isolators bei Überspannungen.

Verschiedenes

Mehrere Berichte und Beiträge zur Aussprache hatten informatorischen Charakter. Forrest (England) berichtete über Rundfunkstörungen durch Isolatoren. Die Intensität der Störungen ist abhängig vom Isolatorstyp und von den Wetterbedingungen. Die Störungen umfassen einen weiten Frequenzbereich von einigen Kilohertz bis etwa 300 MHz.

Es ist notwendig, geeignete Meßverfahren zu entwickeln und die zulässigen Grenzen für die Störungen festzulegen. *Abetti* (USA) gab Meßergebnisse an Höchstspannungsleitungen in den Vereinigten Staaten bekannt. Danach rührten 6 bis 7% der Rundfunkstörungen von den Isolatoren her.

Zu dem schon erwähnten französischen Spiralschirm-Isolator gab *Gion* (Frankreich) zusätzliche Erklärungen. Besondere Merkmale dieses Isolators sind die gewellte Form des Spiralschirmes und die Innenbefestigung der

Armaturen. Durch diese Innenbefestigung werden die Rundfunkstörungen herabgesetzt. Bei den elektrischen, mechanischen und thermischen Prüfungen ergaben sich gute Eigenschaften. Der Spiralschirm-Isolator ist versuchsweise in 150- und 220-kV-Leitungen in Frankreich, der Schweiz und England eingebaut. *Meier* (Frankreich) erläuterte einen Film, in dem das Verhalten des Isolators gegenüber Lichtbögen gezeigt wurde. Bei einer Stromstärke des Lichtbogens von 19 kA, die während einer Zeit von 1 s floß, wurde der Isolator noch nicht ernsthaft beschädigt.

Schutzeinrichtungen und Relais

Von *Otto Poßner*, Frankfurt a. M. *)

DK 061.3(44), „1960“ : 621.316.925

In dieser Fachgruppe wurden neben 12 neu vorgelegten Berichten auch zwei Sammelberichte mit insgesamt 9 Beiträgen erneut zur Diskussion gestellt. Diese enthielten die Ergebnisse von Zwischentagungen, die von der sehr rührenden Studiengruppe „Schutz und Relais“ 1957 in London und 1959 in Nürnberg zum Überbrücken der langen vierjährigen Pause zwischen den Tagungen in Paris abgehalten wurden. Der Sonderbericht *Normand* (Belgien) hatte die Berichte thematisch in 7 Gruppen unterteilt und für jede dieser Gruppen einige Fragen formuliert, die der Diskussion zugrunde gelegt wurden.

Halbleiter in Schutzrelais

Zu diesem Thema lagen zwei Berichte vor, und zwar ein russischer, in dem im wesentlichen eine Übersicht über die im russischen Schrifttum in letzter Zeit beschriebenen oder vorgeschlagenen Schutzrelais mit Halbleitern jeder Art gegeben wurde, und ein belgischer Bericht über einen mit Transistoren arbeitenden Phasenvergleichsschutz, der nach Angabe von *Marchal* (Belgien) seit etwa drei Monaten in einem belgischen Netz ohne Störung in Betrieb ist.

In der Diskussion wurde noch über einige weitere in der praktischen Erprobung befindliche statische Schutzrelais berichtet. So ist seit 1959 im 220-kV-Netz der Electricité de France ein Transistor-Distanzrelais in Betrieb, das bisher bei 40 ein- und mehrpoligen Fehlern in 38 Fällen einwandfrei gearbeitet hat. Nach Angabe der Hersteller beträgt der Verbrauch des Relais sowohl im Strom- als auch im Spannungspfad nur je 2 VA. Auch soll die mit dem Relais erhaltene Stufenkennlinie sich nahezu der Idealkennlinie nähern bei weitgehender Unabhängigkeit vom Kurzschlußstrom.

Von einem englischen Hersteller wurde weiter über ein transistorisches Distanzrelais mit Mho-Kennlinie berichtet, das für das südafrikanische Höchstspannungsnetz entwickelt wurde und sich dort seit kurzer Zeit im Probetrieb bewährt hat. Vom gleichen Hersteller wurden im Lichtbild auch andere transistorische Relais gezeigt, unter anderem Zeitrelais und abhängige Überstromzeitrelais.

Übereinstimmend wurde in der Diskussion als wesentlicher Vorteil der statischen Relais die Senkung des Verbrauchs auf mindestens ein Drittel des bisherigen angesehen, die vielleicht sogar die Verwendung streng linear übersetzender eisenloser Stromwandler ermöglicht. Bemerkenswert war aber, daß seitens der englischen Hersteller des Transistor-Distanzrelais für Südafrika vor allzu hemmungsloser Begeisterung für die Transistorrelais gewarnt wurde. Sie sollten nur da angewendet werden, wo mit ihnen tatsächliche Vorteile erzielbar wären. Die hochentwickelten elektromagnetischen Relais in Gleichrichter-Brückenschaltung, unter Umständen in Verbindung mit Transduktoren, wären z. Z. noch besser und wirtschaftlicher.

Einfluß der Meßwandler auf die angeschlossenen Schutzeinrichtungen

In dieser Gruppe standen ebenfalls zwei Berichte zur Diskussion. *Gertsch* (Schweiz) behandelte in einem Bericht die bekannten, bei ungeeignet ausgelegten kapazitiven Spannungswandlern auftretenden subharmonischen Resonanzen und netzfrequenten Um- und Ausschwingvorgänge und die möglichen Auswirkungen dieser Erscheinungen auf die Schutzrelais, die an derartige Wandler angeschlossen sind. Er machte auch Vorschläge für eine Klassifizierung der kapazitiven Spannungswandler und für neue Prüfverfahren.

In der Diskussion wurde überraschenderweise festgestellt, daß praktisch keine Fehlauslösungen von Schutzrelais bekannt geworden sind, die von kapazitiven Spannungswandlern herrühren, obwohl mehr als 1000 derartige Spannungswandler in Europa verwendet werden. Von französischer Seite wurde in diesem Zusammenhang erwähnt, daß der an kapazitive Spannungswandler angeschlossene Distanzschutz des französischen 380-kV-Systems bisher über 120 mal richtig gearbeitet hat.

Im zweiten Bericht dieser Gruppe war von *Hodgkiss* (England) der Einfluß der bei Kurzschlüssen in den Stromwandlern gelegentlich entstehenden transienten Unsymmetrieströme auf die Schutzeinrichtungen, vor allem den Differentialschutz, behandelt.

In der Diskussion wurde zwar von verschiedener Seite an Hand einiger Beispiele von beobachteten Fehlauslösungen bestätigt, daß Schwierigkeiten durch die erwähnten Stromwandlereffekte besonders beim Differentialschutz auftreten können. Jedoch wurde die Ansicht vertreten, daß z. B. die Einführung von zusätzlichen Dämpfungswiderständen in den Auslösekreis des Differentialrelais oder unter Umständen den sogar schon die ohnedies vorhandenen Stabilisierungseinrichtungen gegen Falsch- und Einschaltströme den Differentialschutz ausreichend gegen die Wirkungen der transienten Unsymmetrieströme der Stromwandler immunisieren. Die Einführung statischer Schutzrelais mit sehr kleinem Verbrauch eröffnet nach Ansicht einiger Fachleute zudem die Aussicht, durch Verwenden eisenloser Wandler die beschriebenen Erscheinungen an der Wurzel zu beseitigen. Bemerkenswert war die von französischer Seite in diesem Zusammenhang vertretene Ansicht, daß die Schnelligkeit der Schutzeinrichtungen auch mit Rücksicht auf die betrachteten Erscheinungen nicht zu sehr übertrieben werden sollte und im allgemeinen Kommandozeiten entsprechend 3 bis 6 Perioden ausreichend seien.

Transformatorschutz

In dieser Gruppe wurden ausschließlich Berichte behandelt, die sich mit Buchholz- und Gasrelais befaßten. Die Ausführungen der belgischen, englischen, französischen und kanadischen Fachleute wurden in der Aussprache noch dahingehend ergänzt, daß mechanische Dauerschwingungen des Transformators in den Quecksilberschaltröhren der

*) Dr.-Ing. O. Poßner ist Mitarbeiter der AEG, Frankfurt a. M.

Buchholz- und Gasrelais zu einer Art Versprühung des Quecksilbers führen. Das versprühte Quecksilber schlägt sich an den Kontaktstiften nieder und bereitet so unter Umständen eine Fehlauslösung z. B. durch eine Erschütterung infolge eines äußeren Kurzschlusses vor. Die Erschütterungssicherheit des Buchholz-Relais interessiert darüber hinaus vor allem in Erdbebengebieten. *Aigner* (Deutschland) berichtete über eine bemerkenswerte Neukonstruktion eines bis zu einer Beschleunigung von $1 g$ (Fallbeschleunigung) erschütterungssicheren Buchholz-Relais, das je Auslösekreis mit zwei kombinierten gegensinnig gedrehten Kontakttringröhren arbeitet. Allgemein wurde die Ansicht vertreten, daß das Buchholz- und Gasrelais trotz noch vorhandener Mängel doch der beste und wirtschaftlichste Transformatorschutz gegen innere Fehler ist, weil es auch beginnende Fehler und heiße Verbindungen, offene Leiter, Gleitfunken und Windungsschlüsse erfaßt. Indessen konnten die mitgeteilten Fehlerstatistiken wegen der im Verhältnis zu der recht hohen Zahl an „Relaisjahren“ doch sehr geringen absoluten Zahlen der richtigen und falschen Auslösungen kein klares Bild über die Güte des Schutzes geben.

Verhalten von Schutzrelais in Sonderfällen

In dieser Gruppe waren zwei recht ungleichartige Berichte zusammengefaßt. *Colding* (Schweden) hat im 30-kV-Kabelnetz der Stadtwerke Stockholm mit über 500 A Erdschlußstrom mit im Kabel künstlich eingeleiteten Lichtbogenerdschlüssen die Zündschwingungen bei Auftreten des Erdschlusses bzw. bei dessen Übergang in einen Dauererdschluß oder mehrpoligen Kurzschluß und ihre Rückwirkungen auf die Erdschlußrelais näher untersucht. Es wurden von ihm häufige Wiederholungen der Zündschwingung durch Erlöschen und Wiederezünden des Lichtbogens beobachtet, wohl verursacht durch die besonderen Versuchsbedingungen. Die Folgerungen, die *Colding* aus seinen Untersuchungen zieht, sind unter anderem, daß die Erdschluß-Richtungsrelais nicht zu schwach gedämpft sein dürfen und daß Induktionsrelais wegen der erforderlichen inneren Phasenverschiebung während der mittelfrequenten Zündschwingungen nicht einwandfrei arbeiten. Bei einigen in Deutschland gefertigten Erdschluß-Richtungsrelais wird übrigens der Ausgleichsvorgang durch eine Ansprechverzögerung überbrückt und damit völlig unwirksam gemacht.

In dem zweiten Bericht dieser Gruppe wurde von *De Bennetot* (Marokko) an Hand eines technischen und wirtschaftlichen Vergleichs nachgewiesen, daß in einer 150-kV-Kuppelleitung in Marokko Reihenkondensatoren einem Synchronphasenschieber überlegen sind. Die Reihenkondensatoren wurden etwa in der Mitte der gesamten Leitung, und zwar an einem Ende eines der beiden selektiv geschützten Leitungsabschnitte eingebaut. Obwohl in bezug auf diesen Leitungsabschnitt der Kompensationsgrad 75 % betrug, ergab sich für den Distanzschutz doch noch ein befriedigendes Verhalten. Der normal gestaffelte Schutz wurde allerdings durch eine HF-Kupplung beschleunigt. Die Betriebserfahrungen waren bisher gut. Bemerkenswert ist, daß der Schutz stets richtig gearbeitet hat, obwohl bei etwa 35 % aller Kurzschlüsse die Schutzfunkenstrecken der Reihenkondensatoren nicht angesprochen haben.

Smedsfelt (Schweden) teilte ergänzend mit, daß in Schweden die Reihenkondensatoren zunächst stets in der Mitte eingebaut worden seien, solange der Kompensationsgrad 45 % nicht überstieg. Dabei waren für den Distanzschutz keine Schwierigkeiten aufgetreten. Bei einem höheren Kompensationsgrad bis zu 60 % würden die Reihenkondensatoren in Schweden jetzt in zwei gleiche Gruppen unterteilt, die bei $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$ der Leitungslänge eingebaut werden. Man habe aber die Tendenz, auch bei höherem Kompensationsgrad die Reihenkondensatoren in einem Punkte zusammenzufassen, um Kosten einzusparen. Schwierigkeiten mit dem Distanzschutz erwarte man dann allenfalls bei dreipoligen Kurzschlüssen, die aber im schwedischen 400-kV-Netz bisher noch nie aufgetreten seien.

Schutz der Eigenbedarfsanlagen von Kraftwerken

Im wesentlichen standen zwei Berichte zur Debatte. Von mehreren Amerikanern wurde über eine Schutzkombination berichtet, die eine ganze Kraftwerksgruppe vom Kessel bis zum Blocktransformator auf anomale Betriebszustände überwacht. Fast alle Überwachungsrelais bewirken eine unverzügliche Stillsetzung des gesamten Blocks einschließlich Kessel und Eigenbedarfsanlage. Obwohl die Amerikaner über ausgezeichnete Erfahrungen mit derartigen Einrichtungen berichteten, konnte in der Diskussion kein einheitlicher Standpunkt gegenüber derart schwerwiegenden Maßnahmen erzielt werden.

Von französischen Fachleuten der Electricité de France wurden in einem Bericht die verschiedenen Möglichkeiten der Eigenversorgung eines Wärmekraftwerks hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften verglichen, unter bewußtem Verzicht auf die wirtschaftliche Seite des Problems. Ohne sich endgültig zu entscheiden, tendierten die Franzosen doch deutlich in Richtung eines zwischen Generator und Blocktransformator angeschlossenen Eigenbedarfs-Transformators, einer Lösung, die sich auch in Deutschland allgemein durchgesetzt hat.

Distanz- und Reserveschutz

Anknüpfend an einen bereits auf der Nürnberger Tagung der Studiengruppe „Schutz und Relais“ besprochenen Bericht wurde erneut lebhaft über die Frage des Reserveschutzes diskutiert. Nach Mitteilungen von norwegischer, russischer und englischer Seite geht die Tendenz in diesen Ländern wenigstens bei den Höchstspannungsleitungen in Richtung Verdoppelung der Schutzeinrichtungen durch Verwendung zweier gleicher oder gleichwertiger Schutzeinrichtungen, während von einem Fachmann aus den USA berichtet wurde, daß man dort ein sogenanntes $1\frac{1}{2}$ -Schalter-je-Einheit-System entwickelt hat, d. h. die Reservehaltung mehr auf die Schalter legt, weil man erkannt hat, daß das Nichtauslösen eines Schalters meist nicht von Fehlern in den Relais- und Wandlerkreisen, sondern von Fehlern im Auslösekreis verursacht wird.

Die Frage des Einflusses des Lichtbogenwiderstandes auf den Distanzschutz wurde ebenfalls noch einmal erörtert. *Leech* (Irland) wies darauf hin, daß der Einfluß des Lichtbogens auf die Distanzmessung dann doch recht erheblich sein kann, wenn es sich um Netze mit geringer Kurzschlußleistung handelt, wie im irischen 110-kV-System, in dem zeitweise nur eine Kurzschlußleistung von 150 MVA ansteht. In diesem Falle könnten Lichtbogenwiderstände bis zu 50Ω auftreten.

Theoretische Probleme der Schutztechnik

Von den beiden Berichten dieser Gruppe befaßte sich der eine von bulgarischen Fachleuten eingereichte mit der günstigsten Auslegung von Relaisfiltern für die Ausselektion des Gegensystems der Spannung vor allem unter Berücksichtigung der Ausgleichsvorgänge bei dreipoligen symmetrischen Kurzschlüssen, während der Bericht von *Zydanowicz* (Polen) eine neue Methode für die Untersuchung der Arbeitsweise von Distanzrelais mittels Kreisdiagrammen behandelte, in dem die stationäre Impedanz und Admittanz des Netzes unmittelbar vor Eintritt des Fehlers verwendet wird. Diese Methode gestattet nach Angabe des Verfassers vor allem auch die Berücksichtigung der Überlast. Dieser Bericht wurde bereits auf der Nürnberger Tagung der Studiengruppe diskutiert, während zu beiden Berichten dieser Gruppe in Paris praktisch nichts gesagt wurde. Diese Tatsache entspricht den allgemeinen Erfahrungen, so daß man hieraus wohl die Folgerung ziehen sollte, daß abstrakt theoretische Berichte für die Behandlung auf der CIGRE-Tagung ungeeignet sind. Dieses Gremium dient doch wesentlich dem Austausch von Erfahrungen und Ansichten über ausgeführte Anlagen und deren Entwicklungsrichtung.

Arbeit des Studienkomitees 4

Auf der Sitzung des Studienkomitees 4 „Schutz und Relais“ wurde die nächste Tagung der Studiengruppe vorbereitet, die im Sommer 1961 in Oslo stattfinden soll. Auf dieser Tagung sollen die Themen „Statische Relais mit Transistoren“, „Schutz von Doppelleitungen“, „einpolige

Kurzunterbrechung“ und Meßwandlerfragen behandelt werden. Im übrigen setzte das Komitee seine Arbeiten auf dem Gebiet der Fehlerstatistik fort, die bereits zu einem neuen Vorschlag für die Erfassung und Auswertung der Statistik des Schutzrelaisverhaltens geführt haben. Diese Statistik soll auch auf die Kurzunterbrechungs-Einrichtungen ausgedehnt werden.

Planung, Betrieb und Stabilität der Netze

Von Helmut Böcker, Stuttgart*)

DK 061.3(44)„1960“ : 621.311.1.004

Die Berichts- und Diskussionsgruppe 32 und das zugehörige Studienkomitee 13 heißen nicht mehr „Stabilität der Netze“, sondern sind in „Planung und Betrieb der Netze“ umbenannt worden; die Bezeichnung „Stabilität“ wird nur noch im Untertitel geführt. In Gruppe 32 sind für die diesjährige Tagung 17 Berichte eingereicht worden. Ferner hat das Komitee einen Tätigkeitsbericht erstattet; auf sieben weitere Berichte aus anderen Gruppen, die zu den Themen der Gruppe 32 Beziehung haben, wird hingewiesen.

Nach diesen Unterlagen hatte M. Magnien (Frankreich), der Berichterstatter für die Gruppe 32, die Aussprache vorbereitet und empfohlen, sie gemäß den folgenden vier Hauptabschnitten zu führen:

1. Leistungs-Frequenz-Regelung gekuppelter Netze,
2. Verhalten der Netze bei Ausgleichsvorgängen,
3. Netzplanung,
4. Hilfsmittel zur Netzberechnung.

Die Aussprachethemen der Gruppe 32 haben sich von Tagung zu Tagung vermehrt¹⁾ 2). Ursprünglich wurde nur über Stabilität verhandelt, es kam die Regelung von Frequenz und Leistung hinzu und schließlich die Netzberechnung. In diesem Jahr wurde neu aufgenommen die Netzplanung mit den Fragen der zweckmäßigen Netzausrüstung und der zu berücksichtigenden betrieblichen und wirtschaftlichen Parameter.

In Gruppe 32 verhandelt man aber zuweilen auch über einzelne Betriebsfragen, wie Spannungs- und Lastschwankungen, über Fragen des Netzschutzes und der Anforderungen an Schalter. Ein neues Thema dieser Gruppe wird voraussichtlich die wirtschaftliche Lastverteilung werden.

Fast 60 Redner nahmen an der diesjährigen Aussprache in Gruppe 32 teil. S. Lalander (Schweden) führte an Stelle der verhinderten Präsidenten des Studienkomitees, S. B. Cray (USA) und I. Herlitz (Schweden), den Vorsitz, und M. Magnien unterstützte ihn bei der Einführung zu den einzelnen Aussprachethemen.

Leistungs-Frequenz-Regelung

Die hierzu in diesem Jahr eingereichten Berichte waren hauptsächlich theoretischen Fragen gewidmet. Die Verfahren wurden nach den Methoden der Regelungstechnik kritisch untersucht. Es wurden die Eigenschaften des Regelkreises, bestehend aus Netz und Regler, berechnet. Um den Forderungen zu entsprechen, die der Verbraucher oder der Verbundbetrieb stellt, wurden die neuen Möglichkeiten ausgenutzt, die moderne Regel- und Steuergeräte bieten.

Den Bemühungen um die Regelung von Frequenz und Übergabeleistung in den letzten Jahren ist es zu verdanken, daß heute größte Netzverbände über verhältnismäßig schwache Kuppelleitungen ohne Störungen im Verbund betrieben werden können. Hierbei wird die Frequenz mit einer derartigen Genauigkeit konstant gehalten, wie es mit Rücksicht auf frequenzempfindliche Verbraucher, ja selbst den

Betrieb der Synchronuhren, gar nicht erforderlich wäre. Ganz selten hört man noch von Störungen, durch die eine Kuppelleitung infolge Überlastung abgeschaltet werden muß.

Eine Arbeitsgruppe des Studienkomitees 13 unter Leitung von R. Renchon (Belgien) hat einen Bericht vorgelegt, der sich mit der Beurteilung der verschiedenen in Gebrauch befindlichen Verfahren der Netzregelung befaßt und zur einheitlichen Begriffsbildung beitragen soll. Es werden in der Sprache der Regelungstechnik die Blockschaltungen der einzelnen Verfahren und die Übergangsfunktionen angegeben. In der Übersicht nach dem heutigen Stand werden in der Klasse der integrierenden Verfahren vier bekannte Typen aufgeführt, die sich durch die Art der Meßgrößen, sei es Frequenz, Übergabeleistung, Drehung oder Gang, und durch die Reglercharakteristik unterscheiden. In der Klasse der nicht integrierenden Verfahren wird nur ein Typ genannt, bei dem die Leistung proportional und anteilig gemäß dem Verbrauch gesteuert wird, ohne daß Frequenz und Übergabeleistung unbedingt eingehalten werden.

In seinem Bericht über das Frequenzverhalten von Netzen wendet I. Preminger (Israel) die Autokorrelationsfunktion³⁾ an, um das Spektrum der Frequenzschwankungen im Netz zu berechnen. Wäre dies zulässig, so könnte man das Frequenzverhalten der Netze durch die spektrale Bandbreite eindeutig kennzeichnen.

Wenn man die Übergangsfunktion der Netze mißt, kann man ebenfalls das Frequenzspektrum berechnen. Ohne künstlich herbeigeführte Abweichungen von Frequenz und Leistung ist die Übergangsfunktion aber schwierig zu erhalten. M. Mesarović und Mitarbeiter (Jugoslawien) haben ihren Bericht dem Problem des Zusammenhangs von Spektrum und Übergangsfunktion mit den natürlichen statistischen Schwankungen von Frequenz und Leistung im Netz gewidmet. Mit Hilfe eines Analogrechners haben A. Greselin und F. Saccomanno (Italien) in ihrem Bericht die Übergangsfunktion von zwei Netzen, die gekuppelt sind und deren Frequenz und Übergabeleistung geregelt werden sollen, bestimmt. Es werden zahlreiche gerechnete Kurven mitgeteilt, die das Verhalten der Netze nach einer sprungartigen Veränderung der Leistung zeigen.

In einem schwedisch-finnischen Bericht von A. Wedeen und Mitarbeitern und einem norwegisch-schweizerischen Bericht von H. Sinding und E. Andres wird die „Güte“ der Netzregelung untersucht. Es zeigte sich, wie es bei großen Regelleistungszahlen der Netze schwierig wird, mit Reglern, die keine empfindliche Frequenzmessung haben und die nicht schnell reagieren, die Sollwerte zu halten. Nach beiden Berichten kann die Aufgabe mit Hilfe elektrohydraulischer Turbinenregler, die der Netzregler steuert, befriedigend gelöst werden.

Für die Aussprache waren Beiträge gewünscht worden: zur Reglertheorie, zu den Verfahren und der Regelgeschwindigkeit, zur Regelgröße des zeitlichen Differentialquotienten der Frequenz, zum Verhalten der Regler bei Netzstörungen und schließlich zur Terminologie der Netzregelung. Kein Redner meldete sich, um sich zur Reglertheorie grundsätzlich zu äußern. Man ist offenbar mit dem Ergebnis der Arbeits-

*) Prof. Dr.-Ing. H. Böcker ist Ordinarius für Energieübertragung und Hochspannungstechnik an der TH Stuttgart.

1) Böcker, H.: Netzstabilität, Leistungs- und Frequenzregelung. (15. CIGRE-Tagung.) ETZ-A Bd. 75 (1954) S. 496-498.

2) Boll, G.: Leistungs- und Frequenzregelung, Netzstabilität. (17. CIGRE-Tagung.) ETZ-A Bd. 79 (1958) S. 598-601.

3) Vgl. z. B. Becker, R.: Über die Beschreibung stationärer statistischer Funktionen. Z. angew. Phys. Bd. 4 (1954) S. 231-235.

gruppe des Komitees zufrieden. Zu den Parametern des Regelkreises, den Verfahren und den Ergebnissen in den geregelten Netzen wurde dagegen ausgiebig Stellung genommen.

Redner aus den Vereinigten Staaten und aus England konnten mitteilen, daß der Regelgeschwindigkeit in jedem Fall große Bedeutung für den Erfolg der Regelung zukommt. Gute Abstimmung der Zeitkonstanten des Regelkreises aufeinander, so führte *S. B. Morehouse* (USA) aus, ergibt eine stabile Regelung. Möglichst viele Einheiten sollten vom Regler angesteuert werden; dann sind die Lastschwankungen je Einheit am geringsten. Auf unabhängige Lastaufteilung kommt es dabei sehr an, sonst können Leistungsschwingungen auftreten. Ähnlich äußerte sich *Ch. Concordia* (USA); er unterstrich die Bedeutung der genauen Messung der Regelgrößen und der schnellen Regelung, um die „toten Zonen“ bei der Regelung zu vermeiden.

E. B. S. Powell (England) möchte auch für Dampfturbinen die elektrischen Drehzahlregler eingeführt wissen, wie sie bei Wasserturbinen bereits üblich sind. Solchen Maschinenreglern können die Steuerbefehle des Netzreglers bequemer und rascher mitgeteilt werden als den mechanischen. Der Netzregler sei auf jeden Fall ein modernes Gerät, so erklärte *Powell*, dessen Anpassung an ältere Maschinengruppen immer möglich sei; aber es lasse sich nicht verantworten, moderne Maschinengruppen mit unvollkommenen Netzreglern zu steuern. *E. C. Scott* (England) teilte mit, daß die Handregelung im britischen Netz eine Frequenzbandbreite von $\pm 0,05$ bis $0,06$ Hz ergeben habe, die automatische Leistungs-Frequenz-Regelung aber nur $\pm 0,005$ bis $0,01$ Hz. Möglichst viele Kraftwerke bzw. große Einheiten seien in die Netzregelung einzubeziehen.

Den französischen Standpunkt hierzu kennzeichnet *B. Favez* etwa so: Zentrale Regelung vieler Kraftwerke ist wünschenswert, aber diese soll nicht zu schnell durchgeführt werden, wenn Integratoren verwendet werden. Für das westeuropäische Netz halte man die langsame Regelung für die geeignete. Außerdem forderte *Favez*, daß die Statik der Drehzahlregler an moderne Maschinen möglichst gering sein soll. Im französischen Netz beträgt z. Z. die resultierende Statik $2,5$ bis 5% je nach Maschineneinsatz, und bei den normalerweise auftretenden Lastschwankungen von 20 MW ergeben sich Frequenzänderungen von $0,002$ bis $0,004$ Hz. Wenn die Maschinenanlagen erneuert sein werden, wird man auch im französischen Netz die Regelgeschwindigkeit erhöhen können.

Zwischen *M. Lecrique* (Frankreich) und *J. Preminger* (Israel) entspann sich ein Meinungsstreit über die Berechtigung, die Autokorrelationsfunktion anzuwenden. Zunächst wurde von *Lecrique* der statistische Charakter der Frequenzschwankungen bezweifelt; es träten nämlich auch periodische Schwankungen auf. Dann sei die Frequenzmessung zu ungenau; denn bei Frequenzschwankungen von etwa 50 mHz könne eine Frequenzmessung, die für 10 -mHz-Änderungen zu unempfindlich sei, keine brauchbare Auswertung erhoffen lassen. Dieser Meinungsstreit ließ auch die Frage aufkommen, wo man die Frequenz messen solle — zentral oder an mehreren Stellen des Netzes —, also wie üblich in der Nähe der Regelkraftwerke. Hierzu führte *E. C. Scott* aus, daß man in England an 7 Punkten des Netzes die Frequenz messe und daß man über die Ergebnisse dieser Messung auf der nächsten CIGRE-Tagung berichten wolle.

Die Frage, ob man besser das Spektrum der Frequenz- und Leistungsschwankungen ermitteln solle oder ob die Übergangsfunktion geeigneter sei, konnte von keinem Redner eindeutig entschieden werden. Daher wurde der kritische Bericht von *Mesarović* und Mitarbeitern hier besonders begrüßt.

Zu den Netzregelversuchen zwischen Schweden und Finnland sowie in Norwegen wurden von den Verfassern der Berichte 311 und 322 einige Ergänzungen gemacht. Vergleichend hierzu teilte *Groza* (Rumänien) einige Ergebnisse von rumänischen Netzversuchen mit und machte auf die

Schwankungen der Blindlast und die Reaktion der Spannungsregler aufmerksam, die bei Wirkleistungsstößen auftreten. *P. Langer* (Schweden) äußerte, den verwendeten elektronischen Reglern könne ohne weiteres auch der zeitliche Differentialquotient der Frequenz als Vorführgröße aufgeschaltet werden, und gab zu beachten, daß sich schnelle Regler für die Stabilität der Netze günstig auswirken.

Verhalten der Netze bei Ausgleichsvorgängen

Synchronmaschine am Netz

Der Bericht von *V. Easton* und Mitarbeitern (England) über das Verhalten der Spannungsregler mit Rotorwinkelbegrenzung, der Bericht von *V. A. Venikow* und Mitarbeitern (UdSSR) über die Anwendung der Schnellregelung bei den Übertragungssystemen für Wechsel- und Gleichstrom in der UdSSR, schließlich der Bericht von *P. Langer* und *K. E. Johansson* (Schweden) über Spannungsregelung mit Rotorwinkeleinfluß zeigen, daß sich stabilitätsverbessernde Maßnahmen durchzusetzen beginnen, die auch die bisher sehr schwierigen Übertragungsaufgaben zu lösen vermögen.

Bisher hat man kaum gewagt, eine Synchronmaschine an der Grenze der sogenannten statischen Stabilität zu betreiben. Dies bietet heute keine Schwierigkeit mehr; es ist wohl bezeichnend, daß der unklare Begriff „dynamische“ Stabilität verschwindet und daß man nur noch von der Stabilität schlechthin spricht, die an sich ein dynamisches Problem ist und für die der stationäre und der transiente Betriebsfall zu betrachten sind. Das eingehende Studium der tatsächlichen Vorgänge beim Parallellauf der Synchronmaschine mit dem Netz und der Möglichkeiten, auf diese Vorgänge einzuwirken, ist in den letzten Jahren sehr erfolgreich gewesen, vor allem, weil man die Synchronmaschine in allen Einzelheiten ihres Verhaltens verstanden hat und elektronische Rechenanlagen zu benutzen lernte.

Im erwähnten englischen Bericht wird untersucht, wie man das Außertrittfallen der Synchronmaschine abfangen kann, wenn die Erregung durch einen sogenannten Rotorwinkelbegrenzer stoßartig gesteuert wird. Der russische Bericht zeigt, daß die Spannung der Hochspannungssammelschiene gestützt werden muß, um die Stabilität zu sichern, indem man auf die Erregung der Kraftwerksgeneratoren zusätzlich den Lastwinkel, gegebenenfalls auch dessen ersten und zweiten zeitlichen Differentialquotienten wirken läßt. Bei diesen Stabilitätsversuchen, die am Modell der großen russischen Übertragungsanlagen durchgeführt wurden, hat man auch die Stromrichtersteuerung der Hochspannungsgleichstrom-Übertragung durch die Spannungs- und Lastwinkelgrößen der parallelen Drehstromanlagen beeinflusst. Im schwedischen Bericht wird die Aufgabe, die vom Lastwinkel abhängigen Größen auf die Erregung einwirken zu lassen, theoretisch und mit Hilfe von Analogrechnern sowie auch am Netz selbst untersucht.

Am Rande dieses Aufgabengebietes liegen die Probleme von zwei weiteren Berichten. *I. Hano* und Mitarbeiter (Japan) geben in ihrem Bericht für die Synchronmaschine Bedingungen an, unter denen sie von selbst in Tritt fällt, und die kritischen Schlupfbereiche, in denen dies mißlingt. *E. B. Powell* und Mitarbeiter (England) berichten über den Betrieb von mittelgroßen Synchrongeneratoren als Phasenschieber mit stark untererregtem Läuferfeld für Schwachlastzeiten. Die Turbine läuft dabei mit geschlossenen Dampfventilen unter Vakuum mit.

In der Aussprache führte *M. P. Kostenko* (UdSSR) aus, daß bei den Versuchen nicht nur vom Lastwinkel, sondern auch von der Spannung und dem Strom die Differentialquotienten den Spannungsreglern als Regelgrößen aufgeschaltet worden seien, um allen Schwankungen vorführend durch die richtige Erregermaßnahme sofort entgegenzuwirken; hierdurch seien ausgezeichnete Erfolge erzielt worden. Man werde später davon abgehen, jedem Generator eines Kraftwerks seinen eigenen Regler beizugeben; vielmehr sollen die Generatoren einen gemeinsamen sehr wirksamen Regler für alle Erregerkreise erhalten. Dieser Regler

könne möglicherweise auch die Turbinen-Drehzahlregler mit steuern, damit man die Leistung in der für den stabilen Betrieb richtigen Größe rasch erhält.

Bemerkenswert ist, daß bei einer Regelung, wie sie bei den russischen Anlagen vorgesehen ist, d. h. wenn unter allen Umständen die Sammelschienenspannung konstant zu halten ist, die bisher für die Stabilität so wichtigen Werte der Generatorreaktanzen von untergeordneter Bedeutung werden. Aber die Erregerspannung, die für solchen Betrieb erforderlich ist, muß etwa bis zum Vierfachen der bei Nennlast notwendigen Spannung gesteigert werden können. *Kostenko* verwies wegen weiterer Einzelheiten der durchgeführten Reglerversuche auf Veröffentlichungen zur diesjährigen internationalen Reglerfachtagung in Moskau.

Nach *K. C. Parton* (England) sind die maximal erforderlichen Spannungen der Erregermaschinen das 4- bis 6-fache der Nennspannungen, wenn mit Rotorwinkelbegrenzung gearbeitet werden soll. Aber das Ergebnis ist, daß sich auch der Betrieb mit Lastwinkeln von beachtlich über 90° el dann ohne Schwierigkeiten noch stabil halten läßt. *P. Langer* (Schweden) bestätigte, daß man durch wirksame Regler für die Erregung den Betrieb weitgehend unabhängig von den Parametern des Generators machen kann. Für die erste schwedische 400-kV-Übertragung hat man noch erhebliche Anstrengungen gemacht, um mit geringen Generatorreaktanzen die Stabilität zu verbessern — ein zweifellos kostspieliges Verfahren.

Eine Reihe von Rednern befaßte sich mit der Frage des Selbstsynchronisierens. Danach sind Schwierigkeiten nicht zu erwarten, wenn der Schlupf gering ist; das Einschalten des Erregerstromes in der richtig zugeordneten Rotorwinkel-lage erhöht die Wahrscheinlichkeit des raschen und sicheren Eintritts. *L. G. Mamikonjantz* (UdSSR) und *P. D. Aylett* (England) wiesen hier auf die verhältnismäßig großen asynchronen Momente der Synchronmaschinen hin; bei 0,2 % Schlupf wird bereits das Nennmoment des synchronen Laufs erreicht. Aber auch der Kippchlupf ist gering, und daher darf eine belastete Maschine nicht sehr stark schlüpfen, wenn sie wieder in Tritt fallen soll. Durch Einfluß auf die Leistung und den Erregerstrom läßt sich der Vorgang beherrschen.

Vorgänge im Netz

Für das schwedische Höchstspannungsnetz mit 400 und 220 kV Übertragungsspannung wurde mit verschiedenen elektronischen Rechnern am Netzmodell und schließlich durch einen umfangreichen Netzversuch die Stabilität im stationären und transienten Betriebsfall untersucht; der Bericht von *B. Nordström* und Mitarbeitern enthält das Ergebnis. Gegenüber 1954 haben sich die Stabilitätsbedingungen im schwedischen Netz erheblich verbessert. Zu verdanken ist dies dem verstärkten Ausbau mit 400-kV-Leitungen, der Verwendung der Reihenkondensatoren, der Kurzschlußfortschaltung, mit der die wichtigen Strecken ausgerüstet sind, und schließlich verschiedenen Verbesserungen der Regelung in den Kraftwerken.

Zwei weitere Berichte betreffen die Sicherheit der Versorgung von Hilfsbetrieben in Wärmekraftwerken, und zwar der Bericht von *I. Friedberger* und Mitarbeitern (Frankreich), ferner der Bericht von *P. Pavesi* und *S. Simonetti* (Italien). Schließlich befaßt sich ein weiterer Bericht von *C. de Benne-tot* und Mitarbeitern (Marokko) mit der Anwendung von Reihenkondensatoren.

Die Aussprache ergab allgemein Anerkennung der schwedischen Pionierleistung auf dem Stabilitätsgebiet; die englischen Fachkollegen, die für das eigene Netz ebenfalls umfangreiche Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt haben, konnten die schwedischen Ergebnisse bestätigen. *P. D. Aylett* (England) wies dabei nach, daß grundlegende Unterschiede zwischen wirklichen Netzen und Modellnetzen mit Mikromaschinen bestehen, und zwar bei den elektrischen und mechanischen Zeitkonstanten. Hiervon werden vornehmlich die asynchronen Momente der Synchrongeneratoren betroffen, die für die Stabilität des transienten Falles so be-

deutsam sind. Während man bei den Maschinen des russischen Modellnetzes hierauf offenbar geachtet hat, scheinen im älteren französischen Modellnetz Mängel dieser Art vorhanden zu sein.

Lastschwankungen

Fernsehgeräte erweisen sich auf Spannungsschwankungen empfindlich, und verschiedene Antriebe, z. B. der Papierindustrie, auch elektronische Regelgeräte und Digitalrechner arbeiten zuverlässiger, wenn die Spannung nicht erheblich schwankt. Nach einer Empfehlung des Komitees 13 war gewünscht worden, daß man über dieses Problem sprechen sollte. Naturgemäß konnte die Bereitschaft dazu nicht groß sein; denn die Verbraucher, die eine stark schwankende Last, insbesondere Blindlast, dem Netz entnehmen, fühlen sich ungern für die Spannungshaltung verantwortlich, aber auch die Versorgungsbetriebe scheuen den meist großen Kostenaufwand, der für die Spannungshaltung in Netzbezirken mit Lastschwankungen erforderlich ist.

G. Hosemann (Deutschland) zeigte in seinem Bericht, daß die Spannungsschwankungen unterdrückt werden können, wenn Synchronmaschinen, die unweit von den Lastschwankungen verursachenden Verbrauchern eingesetzt sind, von geregelten Stromrichtern erregt werden; gegebenenfalls muß eine differentielle Regelgröße zusätzlich angewendet werden.

W. Casson (England) teilte mit, daß im englischen Netz folgende Grenzen der Spannungsschwankungen nicht überschritten werden sollten: bis 66 kV nicht mehr als 1 %; bei 132 kV nur 0,75 %; bei 275 kV etwa 0,5 %. Stärkere Einbrüche der Spannung, die aber weniger als drei Perioden lang dauern, können vernachlässigt werden.

Im Anhang zum Bericht des Komitees 13 hat *Ch. Concordia* (USA) ausführlich den Zusammenhang zwischen Last- und Spannungsschwankungen behandelt. Es werden hier auch Vorschläge gemacht, welche Vereinbarungen sich treffen ließen. Verschiedene Redner waren aber nicht geneigt, ein solches Vorgehen heute bereits zu unterstützen.

Netzplanung

Einen Versuch, den Ausbau der Netze durch Anwendung statistischer Methoden im voraus dadurch zu bestimmen, daß für die Kombination der technisch brauchbaren Anordnungen mit den aus wirtschaftlichen und gewohnheitsgebundenen Gründen notwendigen Bedingungen die größte Wahrscheinlichkeit gesucht wird, machen *J. K. Dillard* und *H. K. Sells* (USA) in ihrem Bericht. Ihre Rechenhilfe ist der Digitalrechner. Das Ergebnis soll die technisch vollkommenste und wirtschaftlich günstigste Lösung der Planungsaufgabe sein. Wenn die Parameter der Aufgabenstellung stets der Wirklichkeit getreu gewählt werden könnten, so brauchte man hieran nicht zu zweifeln. Der Bericht ist als eine Anregung für die mathematische Planungsmethode aufzufassen, von der in den nächsten Jahren sicherlich noch mehr die Rede sein wird.

Um aus der Wachstumstendenz der industriellen Produktion die künftige Ausbauleistung eines Landesnetzes vorauszusagen, haben *D. A. Gueorguiev* und *B. St. Kostov* (Bulgarien) in ihrem Bericht empirische Formeln angegeben, für deren Ableitung ihnen die vergangene Entwicklung als Grundlage gedient hat.

In der Aussprache äußerte *P. Gaussens* (Frankreich) Bedenken wegen der Voraussetzungen der mathematischen Netzplanung. Er empfahl ein Planungsschema, das die geschichtliche Entwicklung berücksichtigt und das vor allem geeignet sein soll, bei bevorstehenden Netzerweiterungen angewendet zu werden. *R. Pélassier* (Frankreich) erläuterte, wie die Lastverteilung mit Berücksichtigung von Speicherkraftwerken mathematisch vorher geplant werden kann, und *J. Pardigon* (Frankreich) meinte, auch die Statistik der Störungen dürfe bei der Netzplanung nicht unbeachtet bleiben. *H. K. Sells* erwiderte mit Nachdruck, daß all dies in der Methode, über die er und *Dillard* berichtet haben, bereits enthalten sei.

Rechenanlagen

Wenn *P. Gaussens* (Frankreich) zu diesem Thema bemerkte, daß Netzmodelle bald völlig den Digitalrechnern werden weichen müssen, so wird dies noch nicht die letzte jener polemischen Stellungnahmen sein, die über die Eignung von Rechenanlagen für Netzuntersuchungen getan worden sind. Die grundlegenden Fragen lauten aber hier: „Welche Rechengeräte sind für eine vorliegende Aufgabe geeignet?“ und „Was kann für das Rechengerät aufgewendet werden, mit dem eine bestimmte Aufgabe zu lösen ist?“ Diese Fragen sind für jeden Fall neu zu beantworten; sie werden aber leider noch unvollkommen beantwortet, da der Ingenieur nur selten schon ausreichend mathematisch vorbereitet ist, der Mathematiker aber dem Ingenieur eine befriedigende Antwort auf diese Fragen kaum geben kann.

Die hierüber vorliegenden Berichte und auch die Aussprache zeigten, daß nur noch wenige grundlegende Fragen der Einrichtung von Rechengeräten zu behandeln sind. Was hierüber heute veröffentlicht wird, ergänzt Bekanntes aus früherer Zeit. Jetzt stehen hervorragende Rechenanlagen zur Verfügung, und das Problem, das mit der Anlage untersucht werden soll, steht im Vordergrund. Das zeigen auch die

Ausführungen der vorstehenden Abschnitte, in denen viel von Rechengeräten die Rede gewesen ist. Daß sie richtig rechnen, bezweifelt niemand, denn sie haben ihre Probe längst bestanden.

Es sei erwähnt, daß ein Bericht von *S. Bernas* (Polen) mit einer systematischen Übersicht über sieben Gleichstrommodelle und vier Wechselstrommodelle vorgelegen hat und daß ein Beispiel für die Anwendung der Gleichstrommodelle zur Bestimmung der Kosten für Netzverluste im Bericht von *D. Carroll* (Irland) enthalten ist.

Bei der Aussprache zeichneten sich neue Anwendungsgebiete der Rechengeräte ab, und zwar die Lastverteilung und die Betriebsüberwachung. So erläuterte *H. Bauer* (Deutschland) den von ihm und seinen Mitarbeitern entwickelten Analogrechner, mit dem die wirtschaftlich zweckmäßige Lastverteilung ermittelt werden kann und der heute in mancher Hinsicht verbessert vorliegt. *P. D. Aylett* (England) schlug vor, man solle mittels geeigneter Meßgeräte Betriebskenngrößen aus dem Netz an elektronische Rechner übermitteln; die Rechner könnten dann fortlaufend das wirtschaftliche Optimum der Kraftwerksleistungen angeben oder auch feststellen, ob Netzabschnitte in Gefahr geraten, überlastet zu werden.

Blitz und Überspannungen

Von *Herbert Baatz*, Stuttgart*)

DK 061.3(44) „1960“ : 621.316.933

Bei der Gruppe 33 „Blitz und Überspannungen“ ging man in diesem Jahr von der vierjährigen Folge ab, um mit der Gruppe 41 „Isolationskoordination“ in einen abwechselnden Turnus zu kommen. Dieser Beschluß erreichte die nationalen Komitees aber zu spät, so daß größtenteils über die jeweils zustehende Anzahl der Berichte schon verfügt war. Daher lagen in der Gruppe nur wenige Berichte vor, abgesehen von dem umfangreichen Komiteebericht mit seinen Anhängen.

Die Aussprache war von dem Gruppenberichterstatte *Golde* in vier Abschnitte unterteilt worden. Die ersten beiden Teile, „Eigenschaften des Blitzes“ und „Schutz von Stationen mit Einführungskabeln“, betrafen vorzugsweise den Komiteebericht selbst. Zusätzlich lag nur noch ein Bericht über Blitzmessungen in Skandinavien vor. In den beiden letzten Punkten der Aussprache wurden „Schaltüberspannungen“ und „Stoßspannungs-Meßtechnik“ behandelt.

Eigenschaften des Blitzes und Schutzwirkung von Erdseilen

Die amerikanischen Erfahrungen der letzten Jahre mit Höchstspannungsleitungen haben gezeigt, daß bei hohen Masten die Häufigkeit von Gewitterstörungen erheblich größer ist, als es auf Grund der bisherigen Untersuchungen angenommen wurde. Das zuständige Studienkomitee hatte sich daher die Aufgabe gestellt, die Grundlagen der Berechnung für die Häufigkeit von Gewitterstörungen kritisch zu überprüfen.

Golde (Bericht 314/I) hat die Verfahren der Messung von Blitzstromstärken mit Magnetstäbchen untersucht. Zuverlässige Werte kann man mit Magnetstäbchen an einzelnen Blitzableitern, Blitzauffangstangen und Erdseilen von Leitungen erhalten. Die Messung an Mastfüßen kann nach amerikanischen Untersuchungen zu erheblichen Irrtümern führen, da man den Ersatzleiter für ein Winkeleisen nicht in dessen Schwerpunkt annehmen kann. Die tatsächlichen Ströme in Masten können größer sein als die auf die bisherige Weise berechneten. Magnetisierungen von Stäbchen bei Polaritätswechsel der Blitzentladung sollte man nicht auswerten wegen der dabei möglichen zu großen Fehler. Die ermittelten Verteilungskurven der Blitzstromstärken aus Messungen an Masten können sich daher zu höheren Werten verschieben. Bei der Auswertung neuerer Messungen sollten daher diese Erkenntnisse verwertet werden.

Zum Verlauf des Blitzstromes berichtete *Berger* über neuere Untersuchungen auf dem Monte San Salvatore. Die Zeitdauer großer Blitzströme liegt im allgemeinen zwischen 20 und 100 μ s. Bei der ersten Teilentladung steigt die Stirn des Stromverlaufes erst langsam an und wird dann zunehmend steiler in etwa 6 bis 8 μ s. Der Scheitelwert bleibt einige Zeit annähernd konstant. Folgende Teilentladungen haben einen erheblich steileren Stirnanstieg. Beim ersten Schlag geht die Öffnung des Blitzkanals somit langsam voran, während die folgenden Entladungen ähnlich einer Wanderwelle im ionisierten Kanal verlaufen. *Allibone* bestätigte die gleiche Erkenntnis aus photographischen Aufnahmen. Beim ersten Schlag steigt die Leuchterscheinung nicht so schnell an wie bei den folgenden.

Wenn auch Modellversuche über die Schutzwirkung von Erdseilen nach dem Bericht von *Provoost* (Bericht 314/II) bei einfachen Anordnungen gute Übereinstimmung mit den Erfahrungen an Leitungen ergeben haben, so werden diese doch vielfach abgelehnt, da der Vorgang der Blitzentladung und der Stoßentladung verschiedenartig sind, zumal wenn das Modell zu sehr verkleinert ist. Für Leitungen genügt es, den Schutzbereich als Winkel darzustellen, wenn auch die tatsächliche Schutzkurve bis zur Erde als gekrümmte Fläche verläuft. Zulässige Angaben ließen sich bis jetzt nur auf Grund der Erfahrungen gewinnen.

In Amerika wurden nach *Abetti* neuere Untersuchungen über die Gewittersicherheit der Leitungen durchgeführt. Zur Messung der Stirn des Stromanstieges wird der Teinograph verwendet (40 Geräte wurden an 345-kV-Leitungen eingesetzt). Als Schutzfehler-Anzeiger sind bereits 500 Geräte eingebaut; außerdem sind an der 460-kV-Versuchsleitung 35 Elektronenstrahl-Oszillographen sowie photographische Geräte mit bewegtem Film eingesetzt.

Ein Schutzwinkel von 30 bis 35°, wie er in Deutschland als zweckmäßig gilt, wird nach *Kostenko* auch in Rußland für 35- bis 110-kV-Leitungen als ausreichend angesehen. Dagegen soll für 220- bis 500-kV-Leitungen je nach Höhe der Schutzwinkel 15 bis 20° sein. Über die zusätzliche Schutzwirkung der Bäume bei Leitungen durch Wälder berichtete *Pesonen* auf Grund von Erfahrungen in Finnland.

Casson (Bericht 416/5; dieser Bericht stand durch ein Versehen nicht zur Diskussion) gab einen Überblick über das Ergebnis seiner Untersuchung über den Schutz von Freileitungen mit Betriebsspannungen über 225 kV durch Erdseile, die er auf Grund der Erfahrungen in sieben Ländern

*) Prof. Dr.-Ing. *H. Baatz* ist Vorstand der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen e. V., Nellingen über Eßlingen (Neckar).

zusammengestellt hat. Es besteht eine Beziehung zwischen der Anzahl der Gewitterstörungen je Kilometer und Gewittertag und dem Schutzwinkel des Erdseiles für die verschiedenen Bauarten der Leitungen. Einfachleitungen sind wegen ihrer geringeren Höhe günstiger als Doppelleitungen. Für diese hat sich bei 15° Schutzwinkel eine Fehlerhäufigkeit von rd. 0,02 je 100 km, Gewittertag und Stromkreis, bei 35° von rd. 0,05 und bei 50° von rd. 0,08 ergeben.

Für den Vergleich der Häufigkeit von Gewitterstörungen in den verschiedenen Ländern wird die bisherige Grundlage der Gewittertage als unzureichend angesehen. Es ist daher vorgeschlagen worden, die Anzahl der Blitzschläge nach Erde je Jahr und Quadratkilometer zu ermitteln. Den von *Pierce-Golde* entwickelten Blitzschlagzähler hat *Müller-Hillebrand* (Bericht 330) unempfindlicher gemacht, um einen geringeren Meßbereich von etwa 15 km Radius zu erhalten. Da in einem geringen Umfang auch Blitze zwischen den Wolken mitgezählt werden, wurde in Schweden durch besondere Beobachtungen ermittelt, daß nur etwa 65 % der angezeigten Blitze solche gegen Erde sind. Für ein verhältnismäßig gewitterarmes Jahr wurden für Südschweden etwa 50 bis 60 Blitze gegen Erde auf 100 km² festgestellt, auf den beiden baltischen Inseln dagegen nur etwa 10 bis 16. Derartige Messungen werden in zunehmendem Umfange in verschiedenen Ländern der Welt durchgeführt. Nach *Golde* liegen bereits über 200 000 Registrierungen vor.

Schutz von Stationen mit Einführungskabeln

Der Überspannungsschutz von Stationen mit Einführungskabel ist nach *Waste* (Bericht 314/III) kein ausschließlich technisches sondern mehr ein wirtschaftliches Problem. *Ignacz* (Bericht 314, Nachtrag) berichtete über Versuche an Modellen. Er sieht den Schutz von Kabeleinführungen mit zwei auf die Freileitung vorgeschobenen Funkenstrecken als ausreichend an. Allerdings ist ein geerdetes Schutzseil über der Leitung kurz vor dem Übergang von der Freileitung auf das Kabel notwendig. Über ähnliche Versuche mit Ventilableitern berichteten auch *Jirku* und *Gert* (Bericht 314, Nachtrag).

Nach *Csuros* sind statistische Erfahrungen notwendig. Das englische 132-kV-Grid-Netz hat Erdseil und niedrige Erdungswiderstände der Maste. An allen Transformator-durchführungen sind Schutzfunkenstrecken mit einer Schlagweite von 66 cm; der Durchschlag tritt bei etwa 30 % des Stoßpegels ein. In neun Jahren traten rd. 500 Störungen durch Blitzeinschläge auf; davon sind in nur 7 % der Fälle die Schutzfunkenstrecken an den Transformatoren meistens

in Kopfstationen, aber auch in einfachen Durchgangsstationen ohne Kabeleinführungen durchgeschlagen. In den rd. 30 Stationen für 132 kV mit mehreren Leitungen und Kabeln ist während dieser neun Jahre kein Überschlag oder Schaden durch Blitz eingetreten (fast 1000 Transformatorenjahre). Eine Ausnahme bilden nur Einschläge direkt in die Station; dafür werden Funkenstrecken als ausreichender Schutz angesehen. In der Praxis werden Ableiter an Transformatoren nur an den Enden von Ausläuferleitungen verwendet, bei Stationen mit mehreren Leitungen aber nur Funkenstrecken. Bei Transformatoren in Blockschaltung mit Generatoren werden Ableiter nur vorgesehen, wenn die Kabellänge kleiner als 200 m ist oder weniger als 4 Leitungen von der Sammelschiene abgehen.

Stavnes (Bericht 314, Nachtrag) gab auf Grund von Messungen einen Bericht über die Dämpfung von Wellen in Kabeln.

Schaltüberspannungen

Zum Thema „Schaltüberspannungen“ lagen zwar drei Berichte vor, von denen sich aber nur ein Bericht mit Überspannungen beim Abschalten von Kapazitäten befaßt. Die beiden anderen Berichte (301 und 307) betreffen Spannungserhöhungen bei Lastabschaltungen und Ausgleichvorgänge bei Erdschluß.

Witt und *Bergström* (Bericht 101) haben beim Abschalten von Freileitungen mit kapazitiven Spannungswandlern von einer Sammelschiene im schwedischen 130- und 400-kV-Netz gefunden, daß bei Wiederzündungen im Schalter durch Reflexion von Wanderwellen höhere Überspannungen am Transformator als am Schalter auftreten können. Dieser Fall entspricht dem Abschalten einer kapazitiven Impedanz mit niedrigem Wellenwiderstand von einer solchen mit höherem Wellenwiderstand.

Meßtechnik

Veverka (Bericht 131/II) berichtete noch über einen interessanten Widerstandsteiler zur Messung von Stoßspannungen, bei dem die Kapazität des Hochspannungsteilers durch einen geerdeten Schirm über die gesamte Länge des Widerstandes vergrößert ist. Der Niederspannungsteil enthält ebenfalls die entsprechenden Kapazitäten und Induktivitäten des Meßkreises auf der Hochspannungsseite. Dieser Teiler wird sich aber kaum für sehr hohe Spannungen bauen lassen. Nicht geschirmte Teiler mit etwa 2000 Ω werden nach *Provoost* für die Messung von abgeschnittenen Wellen über 0,2 μ s als ausreichend angesehen, da der Meßfehler bei einer Zeitkonstante von etwa 10 ns unter 5 % bleibt.

Energieübertragung mit Drehstrom höchster Spannungen

Von Reinhold Bartenstein, Heidelberg *)

DK 061.3(44),1960 : 621.311.12.325.3.027.8

Auf diesem Gebiet lagen außer dem Bericht des Studienkomitees 9 mit Anhang 12 Berichte vor, die der Gruppen-berichter in die folgenden vier Gruppen eingeteilt hatte:

1. Die Zukunft der Höchstspannung und die Wahl neuer Spannungsstufen über 400 kV.
2. Höchstspannung und Übertragungsprobleme bei großen Entfernungen.
3. Der Betrieb von Höchstspannungsleitungen.
4. Koronaverluste und Rundfunkstörungen.

Im Laufe der letzten Jahre sind rund 20 000 km Leitungen für Spannungen über 220 kV gebaut worden, wie *Sporn* einleitend sagte. Diese Tatsache kennzeichnete auch die Bericht-erstattung und Aussprache auf der diesjährigen CIGRE-Tagung. Der Schritt zu Spannungen über 220 kV ist getan. Es liegen bereits Betriebserfahrungen damit vor, sie wurden bekanntgegeben und zur Aussprache gestellt. Außerdem

aber, und nach dem Programm sogar an erster Stelle, richtet sich nun der Blick in die Zukunft der Höchstspannung, d. h. auf die Wahl der neuen Spannungsstufe über 400 kV.

Zukunft der Höchstspannung und Wahl neuer Spannungsstufen über 400 kV

Mit dieser Frage befassen sich ein amerikanischer, ein französischer und ein deutscher Bericht.

Die auf langjähriger Erfahrung beruhende Erkenntnis, daß sich der Verbrauch elektrischer Arbeit in zehn Jahren ungefähr verdoppelt, wurde allgemein anerkannt. Daraus ergibt sich notwendigerweise eine dynamische Betrachtungsweise der Übertragung elektrischer Leistung, die mit der Wirtschaftsentwicklung parallel läuft. Die Notwendigkeit von Spannungen über 400 kV für die Zukunft wurde in der Aussprache nicht in Frage gestellt. Vor einem Jahr schon war im Studienkomitee für Höchstspannung angeregt worden, die nächsthöhere Spannungsebene über 400 kV zu normen. Es wurde betont, daß es nicht Aufgabe der CIGRE

*) Obering. R. Bartenstein ist Leiter der 400-kV-Forschungsanlage in Mannheim-Rheinau.

ist, Normen aufzustellen, aber als naheliegend bezeichnet, daß die CIGRE Empfehlungen dafür gibt. *Sporn, St. Clair* und *Ailleret* zeigen in ihren Ergänzungen zum Bericht des Studienkomitees 9 die ganze Problematik der Normung einer oder mehrerer solcher Spannungen. Der Bericht des Planungsausschusses der Deutschen Verbundgesellschaft ergänzt die Auffassung von *Ailleret*.

Beide Auffassungen, die amerikanische, vertreten durch *Sporn* und *St. Clair*, und man kann sagen die europäische, vertreten durch *Ailleret* und die Deutsche Verbundgesellschaft, gingen von der feststehenden Tatsache aus, daß die Normung auf der 220-kV-Ebene eine weltweite Bedeutung erlangt hatte. Als Gegenbeispiel wird die unglückliche Trennung im Bereich der Frequenz, 50 und 60 Hz, erwähnt. Bei den Spannungen über 220 kV war man dann allerdings nicht mehr so erfolgreich.

In den Vereinigten Staaten von Amerika und in Kanada wurde die Spannung 345 kV weitgehend zur Überlagerung über das 138-kV-Netz und die Spannung 287 kV in geringerem Umfang verwendet. Für die Wahl einer nächsthöheren Spannungsstufe ist der Gewinn an Übertragungsleistung wesentlich. Die Fragen der Verfügbarkeit von Leitungstrassen, der Transportfähigkeit für einen Zuwachs auf längere Zeit und die wirtschaftlichsten Übertragungskosten unterstreichen dies. Ausgehend von den bestehenden Spannungen 138, 230 und 345 kV werden 500 und 690 oder 750 kV als nächsthöhere Spannungsebenen vorgeschlagen, wobei die 380-kV-Ebene Europas und die 345-kV-Ebene der Vereinigten Staaten von Amerika zur gleichen Klasse gezählt wurden, so daß sich bei 500 kV und der nächsthöheren Spannung beide Systeme, das amerikanische und europäische, wieder treffen. Nach Auffassung von *Spoon* und *St. Clair* ist eine um einen Schritt erhöhte Spannung zur Überlagerung über ein bestehendes Netz ungenügend, sie sollte um zwei Schritte höher sein. Dann ergibt sich ein Zuwachs der Übertragungsleistung von rund 1:7. Die vorgeschlagenen Spannungsschritte unterscheiden sich um den Faktor $\sqrt{3}$ bis 2 oder sogar 2,5. Die Verfasser treten für die Normung einer Spannung von 500 kV ein, darüber eher für 750 als für 690 kV. Die Bedeutung der Normung von Spannungen für die Fabrikation wurde teilweise zugegeben.

Ailleret sprach von zwei Philosophien der Normung. Einmal wurde die Spannungsnorm vom Standpunkt der Fabrikation aus betrachtet, das andere Mal vom Standpunkt eines Verbundbetriebes in fernerer Zukunft. Der Normung vom Standpunkt der Fabrikation aus steht meist die oft geäußerte Auffassung der Stromversorgungs-Unternehmen gegenüber, daß für jede Übertragungsaufgabe nur eine wirtschaftlichste Spannung besteht. Dies führt dann zu einer Normung in engen Stufen. Er zeigte aber, daß schon für eine bestimmte Übertragungsaufgabe das Spannungsoptimum sehr flach ist, um so mehr, wenn man noch die Zunahme der zu übertragenden Leistung mit zunehmender Zeit mit in Betracht zieht.

Die andere Philosophie, der Verbundbetrieb, geht von der Auffassung aus, daß eines Tages alle großen Leitungssysteme geeignet sein müßten, unmittelbar miteinander verbunden zu werden. Die Betriebsergebnisse bei gleicher Spannung begünstigen dann auch den Erfahrungsaustausch. Nach dieser Philosophie ist nur der endgültige Zustand von Bedeutung, es ist unerheblich, wenn Systeme auch für längere Zeit in einem Zwischenzustand bleiben, vorausgesetzt, daß letzten Endes die Zahl der von der Normung abweichenden Spannungen gering bleibt. Hier liegt offenbar die größte Verantwortung bei den Stromversorgungs-Unternehmen, und es ist notwendig, sie darauf hinzuweisen.

Der Bericht des Planungsausschusses der Deutschen Verbundgesellschaft erläutert besonders, warum 380 kV für die Bundesrepublik Deutschland die geeignete Spannung ist.

Geht man von den heute verwendeten Spannungen aus, dann ergibt sich folgende Reihe der Nennspannungen 220, 275, 330, 380, 460 und 660 kV, wobei die beiden letzten ein Vorschlag sind. Diese Normung wäre die einfachste Lösung und

würde eine Legalisierung des jetzigen Zustandes sein. Zweckmäßig wäre es aber, nur drei internationale Spannungen für die Zukunft festzulegen, und zwar 220, 380 und 660 kV.

Man muß aber darauf hinweisen, daß die augenblicklichen Abweichungen der Spannungen von diesem Vorschlag von geringerer Bedeutung sind als Abweichungen von der Spannung, die als nächste Stufe für die nächsten zehn oder zwanzig Jahre zu erwarten ist. Diese Tatsache, die in wenigen Jahren deutlich werden wird, muß schon heute erkannt werden.

In der Aussprache trat die Frage der Normung mit Rücksicht auf die Fabrikation zurück, im Vordergrund stand die Wahl der Spannung für die zwei Aufgaben beim Betrieb von Hochspannungsleitungen; einmal ist es der Richtungsbetrieb, also die Übertragung einer bestimmten Leistung auf eine bestimmte Entfernung, wofür die wirtschaftlichste Spannung gewählt wird. Dieser Standpunkt wurde besonders von Kanada und Australien vertreten, aber auch in Schweden liegen ähnliche Verhältnisse vor. Die andere Aufgabe ist der Verbundbetrieb, der eine Normung der Spannungsebenen in nicht zu engen Stufen wünschenswert erscheinen läßt. Diese Betriebsart trifft ganz besonders für Europa und die Vereinigten Staaten von Amerika zu; hier wäre eine Voraussetzung gegeben, Normspannungen festzulegen. Es zeigten sich abweichende Wünsche dieser zwei Gruppen. *Roser* vertrat den deutschen Standpunkt und sprach für eine internationale Normung von 380 kV und von 660 kV als nächste Stufe. Dieser Auffassung sind auch alle europäischen Länder mit Ausnahme der Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken. Die Vereinigten Staaten von Amerika sprachen sich für die Normung von 330 und 460 oder 500 kV aus, mit Ausnahme von Kalifornien, das sich für 380 kV entscheiden will. Als nächsthöhere Spannungsebene wurde 690 oder 750 kV genannt. Allgemein war man aber der Meinung, daß zumindest für die Spannungsstufe um 700 kV eine internationale Übereinkunft erzielt werden sollte. Im Rahmen des Studienkomitees 9 wurde einer Arbeitsgruppe die Vorbereitung dieser Frage für eine gemeinsame Empfehlung anläßlich der nächsten Sitzung übertragen.

Höchstspannung und Übertragungsprobleme bei großen Entfernungen

Hier lagen fünf Berichte vor. Der Bericht von *Nordström, Norlin* und *Gradin* (Schweden) gibt vorerst eine Beschreibung der verschiedenen Verfahren zur Untersuchung der Stabilität im schwedischen Netz bei den einzelnen Ausbaustufen, bringt dann die Ergebnisse und diskutiert die Mittel für die Beeinflussung der Stabilität. An erster Stelle steht der Reihenkonkondensator, der außerdem zur Verbesserung der Lastverteilung zwischen den 400- und 220-kV-Leitungen und der Blindlastverhältnisse verwendet wird. Die Kurzunterbrechung ist eines der besten und billigsten Verfahren zur Verbesserung der dynamischen Stabilität. Die vorwiegend einpoligen Fehler an 400-kV-Leitungen und die steigende Zahl der parallelen Leitungen macht kurze Unterbrechungszeiten nicht mehr so vordringlich. Die Regelung der Erregung der Generatoren ist wirkungsvoll. Mit zunehmender Vermaschung des Netzes wird allerdings die dynamische Stabilität immer weniger entscheidend, die statische Stabilität gewinnt an Bedeutung für die Netzplanung.

Thorton und *Diesendorf* (Australien) beschreiben die 330-kV-Übertragung in Australien. Sie brachten zum Ausdruck, daß sie, dank der Informationen, besonders aus dem Kreis der CIGRE, mit einem Minimum an eigenen Versuchen die Übertragung planen konnten.

Nevanlinna und *Lybeck* (Finnland) schildern die Anwendung und die Vorteile der ringförmigen Sammelschiene in Stationen, die durch die definierte Zahl der Leitungen ermöglicht wird.

Porter und *St. Clair* (USA) beschreiben das 345-kV-System der American Electric Power und Ohio Valley Electric

Corp., das nunmehr 3200 System-Kilometer umfaßt. Die Betriebserfahrungen sind weiter gut, die hohe Zahl der durch Blitze verursachten Überschläge konnte mit der Kurzunterbrechung beherrscht werden. Diese war, alle Fehler — Blitz, Vereisung usw. — zusammengefaßt, in 74 % aller Fälle erfolgreich. Die ursprünglich verwendete Wiedererschaltzeit von rd. 0,46 s (entsprechend 28 Hz) konnte auf rd. 0,36 s (22 Hz) verkleinert werden. Besondere Schwierigkeiten ergaben sich beim Betrieb des Netzes, wenn Vereisung und Schwingungen an den Leiterseilen auftraten. Damit man Kurzschlüsse durch schwingende Leiterseile vermeidet, wurde der mittlere Leiter bei senkrechter Leiteranordnung um 2,4 m weiter nach außen gesetzt, als ursprünglich vorgesehen war, und die größte Spannfeldlänge auf 300 bis 375 m begrenzt.

Krikuntchik, Rokotjan und Yakub (UdSSR) berichteten über die 400-kV-Leitung Kujbyschjew—Moskau, die 500-kV-Leitungen Kujbyschjew—Ural und Stalingrad—Moskau und über 330-kV-Systeme. Durch die Umstellung von 400 kV auf 500 kV wird der Abstand der Spannung zu 220 kV zu groß, so daß für die Zukunft auf 330 kV übergegangen werden soll. Damit bekommen die Vereinigten Staaten von Amerika und die Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken in Zukunft voraussichtlich die gleichen Spannungsebenen 330 und 500 kV.

In der *Aussprache* wurde bestätigt, daß die Reihen-kondensatoren Schweden erlaubt haben, das Spannungsniveau von 400 kV beizubehalten. Die Bedeutung der Kurzunterbrechung wurde allgemein anerkannt. Wurde von einer Seite als wünschenswert gehalten, die spannungslose Pause zu verringern, so wurde von anderer Seite mehr Wert auf die Sicherheit des einwandfreien Arbeitens der Geräte gelegt. Eine Pause von 0,4 s hat sich als ausreichend erwiesen. Keine einheitliche Meinung herrschte über die Frage der ein- oder dreipoligen Kurzunterbrechung. Bei Leitungslängen über 200 bis 300 km ist die einpolige Kurzunterbrechung nicht mehr möglich. Die Entionisierung des Lichtbogens wird aber beschleunigt, wenn Nebenwiderstände im Schalter verwendet werden, welche die Leitung im abgetrennten Zustand an Erde legen. Die Bedeutung der Regelung der Erregung der Generatoren wurde anerkannt; es müssen aber noch Fortschritte in dieser Richtung gemacht werden.

Betrieb von Höchstspannungsleitungen

In einem Anhang zum Bericht der Studienkomitees 9 stellt *Casson* (Großbritannien) Informationen aus sieben Ländern über den Betrieb von Hochspannungsleitungen über 225 kV zusammen und wertet sie aus. Daraus geht hervor, daß der Blitz die Hauptursache für Leitungsausfälle ist und daß die Isolation die schwächste Stelle der Leitungsausrüstung darstellt. Der Bericht zeigt ferner, daß die Kurzunterbrechung sich sehr erfolgreich bewährt hat. Die Beherrschung von Erdschlüssen mit Hilfe der Kurzunterbrechung kann mit der Verwendung von Erdseilen konkurrieren. Es ergibt sich weiter ein Zusammenhang zwischen den Blitzüberschlägen je Kilometer Leitungslänge und Sturmtag für verschiedene Arten von Leitungskonstruktionen und Erdseilschutzwinkel.

Die *Aussprache* brachte ein Für und Wider in bezug auf das Erdseil. Die Meinung darüber war abhängig davon, welches Vertrauen in die Funktion der Kurzunterbrechung gesetzt wird.

Koronaverluste und Rundfunkstörungen

Über dieses Gebiet lagen sechs Berichte vor. Die Sachlage wird vielleicht am besten dadurch gekennzeichnet, wenn man hervorhebt, daß zwei Berichte die Beschreibung neuer Versuchsstationen bringen, während drei Berichte sich mehr oder weniger abschließend mit den durchgeführten Versuchen befassen.

Abetti (USA) beschreibt das Versuchsprogramm der General Electric in Pittsfield. Eine Versuchsleitung von rd. 7 km Länge für eine höchste Betriebsspannung bis zu

750 kV ist im Bau und wird voraussichtlich Ende dieses Jahres in Betrieb genommen werden; allerdings vorerst nur mit einer Spannung von 460 kV. Die Ausrüstung mit Instrumenten für Korona- und Störpegelmessungen und auch für andere Versuche ist sehr umfangreich. Das Ziel ist die Sammlung experimenteller Ergebnisse auf einer viel breiteren Grundlage, als dies in anderen Versuchsstationen getan worden ist, „wobei das Konzept und die Verfahren der Dauermessung, wie sie in der Versuchsstation Rheinau zuerst verwendet wurden“, erweitert werden.

Cassan und McMurtry (Kanada) beschreiben die 600-kV-Versuchsstation Coldwater. Zwei Versuchsleitungen von je 750 m Länge werden mit den zugehörigen Meßeinrichtungen für die Messung der Koronaverluste und des Störpegels aufgebaut. Bündelleiter mit drei und vier Teilleitern werden untersucht.

Burgsdorf, Egorova, Emeljanov und Tihodeev (UdSSR) berichteten über Messungen der Koronaverluste bei Spannungen bis zu 750 kV und brachten außer einer Formel für die Berechnung der Koronaverluste, die eine gute Näherung auch an die in anderen Ländern erzielten Ergebnisse zeigt, auch Ergebnisse von Störpegelmessungen.

Yamada und Kondo (Japan) faßten die Ergebnisse der Störpegeluntersuchungen in Japan in verschiedenen Versuchsanlagen und an Betriebsleitungen zusammen. Die Meßergebnisse führten auch zu einem Verfahren der Vorausbestimmung des Störpegels, das in seinen wesentlichen Merkmalen mit dem im deutschen Bericht erwähnten übereinstimmt.

Bartenstein brachte die Auswertung der Störpegelmessungen, die seit 1953 in Rheinau an Versuchsleitungen und an verschiedenen Orten an Betriebsleitungen durchgeführt worden sind. Diese Messungen liefen seit 1953 in Form von Dauermessungen (statistische Messungen), ergänzende Messungen von Augenblickswerten erleichterten die Auswertung nach verschiedenen Parametern. Die Natur des Störpegels wurde erläutert und ein Verfahren der Vorausbestimmung des Störpegels von Leitungen angegeben.

In der *Aussprache* betonten die Vertreter der Vereinigten Staaten von Amerika die Notwendigkeit der Berechnung der Ausbreitung des Störpegels einer Leitung mit Hilfe eines Elektronenrechners, wie sie *Adams* angegeben hat, wobei die Störgröße experimentell bestimmt werden muß. Die Annahme einer einzigen Oberflächenfeldstärke als Bezugsgröße für das Drehstromsystem sei nicht ausreichend, es sind die Randfeldstärken der drei Leiter zu berücksichtigen. Allerdings wird die Extrapolation der Ergebnisse von Versuchsleitungen auf das Verhalten von langen Betriebsleitungen als möglich anerkannt, wenn die Konstruktionswerte der beiden Leitungen ungefähr ähnlich sind. Dann ist es möglich, daß in diesem Fall die Benutzung des Verfahrens nach *Adams*, das also einen Elektronenrechner erforderlich macht, nicht gerechtfertigt ist, und das vereinfachte Verfahren, wie es von *Bartenstein* vorgeschlagen wurde, annehmbar ist. Frankreich schloß sich der Auffassung der amerikanischen Vertreter an, d. h. der Berechnung mit Hilfe des Elektronenrechners.

Von deutscher Seite wurde darauf hingewiesen, daß zweckmäßigerweise die Genauigkeit einer Berechnung mit den praktischen Gegebenheiten in Übereinstimmung zu bringen ist. Die Randfeldstärke an der Oberfläche eines Leiters einer Hochspannungsleitung, die vereinbarungsgemäß als Bezugsgröße verwendet wird, kann nur, wie auch in der Vereinbarung zum Ausdruck kommt, als ein Mittelwert über ein angenommenes Spannungsfeld der Leitung berechnet werden. Es ergeben sich also stellenweise erhebliche Abweichungen vom tatsächlich auftretenden Wert. Außerdem können durch das Wetter Änderungen des Störpegels im Verhältnis bis zu 1:30 auftreten, wobei die Streuung bei konstanter Witterung einem Verhältnis von rd. 1:2 entspricht. Wenn man daher die Ergebnisse einer Berechnung oder Messung betrachtet, muß man diese Unsicherheit mit berücksichtigen.

Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom

Von Erich Schulze und Friedrich Hölters, Berlin*)

DK 061.3(44)„1960“ : 621.311.12 : 024.027.8

Das Interesse an den Problemen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ist sehr groß, und an vielen Stellen des Auslandes wird intensiv an diesen Fragen gearbeitet. Neben der Sowjetunion und Schweden ist nun auch in Großbritannien die Entwicklung aufgegriffen worden und der Bau einer Versuchsanlage vorgesehen. Aus den vorliegenden Berichten und Mitteilungen und aus den Diskussionen war die Vielzahl der Probleme und die große Breite der notwendigen Entwicklungsarbeit zu ersehen. Manche Aufgaben sind noch zu lösen. Die in Kürze in Betrieb gehenden Übertragungen England—Frankreich und Stalingrad—Donbas werden viel zur Klärung der noch offenen Fragen beitragen.

Übertragungs- und Versuchsanlagen

Die Anlage K a s h i r a — M o s k a u (200 kV, 30 MW) ist seit Ende 1950 in Betrieb. Vorübergehende Schwierigkeiten haben sich ergeben durch Zündaussetzer der Gefäße, Rundfunkstörungen (verringert durch Beschaltung der Brücken mit Kondensatoren und Drosseln), Überspannungen beim Einschalten der Anlage, Betrieb bei kleiner Last und lückendem Gleichstrom (beseitigt durch Dämpfungsglieder), Zündschwingungen, verbunden mit Löschen des Anoden- und Erregerstromes (beseitigt durch zusätzliche Reaktanz im Anodenkreis). Nach 4½ Jahren Versuchserfahrungen wird die Reihenschaltung von drei Gefäßen nicht als zweckmäßige Lösung angesehen. Als Hauptnachteil wird die ungleiche Spannungaufteilung bei Zündaussetzern angesehen, die das nicht gezündete Gefäß spannungsmäßig überbeansprucht. Die Reihenschaltung von zwei Gefäßen hat sich als sehr sicher erwiesen und wird für die Übertragung Stalingrad—Donbas verwendet. Seit 1955 wurden folgende Fragen untersucht: verschiedene Stromrichterschaltungen (zwei Brücken an einem Transformator, Reihenschaltung von Brücken mit unterschiedlicher Gefäßzahl), Betrieb mit Energierichtungsumkehr, Verhalten der Freileitungen, Versuche mit Gleichstrom-Leistungsschaltern, wechselseitige Beziehungen zwischen Gleichstromübertragung und Wechselrichternetz, Betrieb mit geerdetem Mittelpunkt, Erderanordnungen. Zur Zeit werden Versuche mit Zwischenentnahme auf der Gleichstromseite durchgeführt, wobei eine der beiden Wechselrichterstationen mit einem Gleichstromschalter ausgerüstet ist. Diese vorstehend genannten Untersuchungen sind notwendig für die Projektierung wichtiger Übertragungsanlagen in Sibirien.

Die schwedische Übertragung nach Gotland (100 kV, 20 MW) ist seit 1954 in Betrieb. Die Benutzungsdauer betrug in den beiden letzten Jahren 92 %. Durchschnittlich sind 15 Fehler im Jahr durch die Gleichstromübertragung aufgetreten. Die Ursache waren meist äußere Installationen und die äußeren Spannungsteiler der Gefäße. Nach entsprechenden Verbesserungen vor einem Jahr sind nur noch wenig Störungen aufgetreten, und in diesem Jahr ist nur eine Unterbrechung vorgekommen.

Die Kanalübertragung Frankreich—England (± 100 kV, 160 MW), die ursprünglich für Drehstrom vorgesehen war, bot die Möglichkeit, eine Gleichstrom-Versuchsleitung ohne große zusätzliche Kosten zu erstellen. Die Verbindung von zwei leistungsstarken Netzen mit mehreren Tausend Megawatt über eine 160-MW-Kuppelleitung läßt außerdem eine gelegentliche Unterbrechung der Übertragung zu. Die Wirkleistungsübertragung ist sehr einfach. Wichtige Probleme sind: zahlreiche Hilfseinrichtungen, Blindleistungsverbrauch, Oberschwingungen und Beeinflussung von Schwachstromanlagen. In der Stromrichterstation Bou-

logne sollen zunächst im Kreisbetrieb Versuche unter anderem bezüglich der Filter und Rundfunkstörungen durchgeführt werden. Frankreich hat für die Gleichstromübertragung zunächst keine weiteren Pläne. Es wurden wichtige Einzelheiten über die Planung und Ausführung der Kanalübertragung mitgeteilt, die je Station zwei in Reihe geschaltete Brücken enthält. Die Glättungsdrossel ist in der Mitte angeordnet, und nur eine Station (Dungeness) ist über die Drosselmitte geerdet. Die Verlustleistung beträgt je Station bei 100 MW für Gefäße und Anodendrosseln 245 kW. Ferner werden benötigt für Steuerung und Regelung 15 kW, Gefäßhilfsbetriebe 200 kW, Kompressoren, Pumpen und Lüfter 400 kW. Die beiden Stationen werden über Schwachstromkabel für Schutz, Regelung und Meldung verbunden.

Der Bericht über die Gleichstromübertragung Stalingrad—Donbas (± 400 kV, 720 MW) enthält Angaben über die Auslegung und den räumlichen Aufbau der Übertragung: Je Station werden acht Brücken in Reihe geschaltet. Die Mitte ist auf beiden Stationen geerdet. Die Blindleistung wird im Donbas durch Kondensatoren, die als Filterkreise ausgebildet sind, geliefert und in Stalingrad durch Generatoren. Zwei Gefäße hat man in Reihe geschaltet, um die Arbeitsweise zu erleichtern und die Betriebssicherheit zu prüfen. Die Stromrichterstation im Donbas hat eine Nutzfläche von 3800 m², die Stromrichterhalle ist 14 m hoch. Die Erdung ist 24 km von der Station entfernt und besteht aus Stahlelektroden mit Koksauflage. Die Leitungsisolation wird durch Ableiter mit Ansprechwerten von 1,5 bis $1,7 \times 420$ kV begrenzt. Die Einzelbrücken sind mit Ableitern und RC-Gliedern versehen. Die Gleichstromleitung hat eine Stromdichte von 0,63 A/mm², eine größte Feldstärke von 24 kV/cm, mittlere Koronaverluste von 4 kW/km, das Gewicht der T-Maste beträgt 4,32 t. Die Energierichtungsumkehr ist automatisch oder auch von Hand möglich. Die Übertragungsleistung kann konstant oder nach einem Zeitplan oder entsprechend den Erfordernissen der Frequenzhaltung geregelt werden. Die Verluste betragen bei Nennbetrieb etwa 2,3 % der Nennleistung für die Leitung, 2,6 % für die beiden Stationen.

Großbritannien plant, in einem Kraftwerk im Norden Londons eine Gleichstromversuchsleitung (70 kV, 900 A) mit Stromrichtern in Dreiphasen-Brückenschaltung zu bauen, die Ende 1961 in Betrieb gehen soll. Die entsprechenden Stromrichtergefäße werden von der englischen Elektroindustrie geliefert. Vorerst ist Kreisbetrieb, später asynchrone Kupplung von zwei Netzen und dreiphasiger Kurzschlußbetrieb zur Gefäßprüfung vorgesehen.

In Italien liegen zwei Projekte vor (Jugoslawien—Italien und Sardinien—Italien). Ferner besteht ein Interesse an Gleichstromübertragungen in Venezuela (asynchrone Kupplung), Neuseeland und Kanada.

Schaltung der Stromrichter

Bei der Diskussion der Stromrichterschaltungen wurden Brückenleistungen von 125 MW (125 kV, 1000 A) und 150 MW (125 bis 150 kV, 1000 bis 1200 A) genannt. Die Stromrichtertransformatoren können als Einphasentransformatoren (je 90 t bei 125 MW) oder Dreiphasentransformatoren (200 t bei 125 MW) ausgeführt werden. Durch Reihenschaltung von zwei derartigen Brücken mit je 6 Ventilen und einem by-pass-Ventil¹⁾ kann eine 12-pulsige Einheit von 250 bis 300 MW mit einer Gleichspannung von 250 bis 300 kV bei 1000 bis 1200 A erstellt werden. Eine Reihenschaltung dieser Zwölfer-Gruppen ergibt dann bei insgesamt 2×2 Brücken: 500 bis 600 MW, ± 250 kV bis ± 300 kV, oder bei 2×4 Brücken: 1000 bis 1200 MW, ± 500 kV bis ± 600 kV.

Nach schwedischer Ansicht bringt eine Reihenschaltung von Gefäßen nicht den erwarteten Vorteil hinsichtlich der

*) Prof. Dr.-Ing. E. Schulze ist Chefelektriker der Berliner Kraft- und Licht (Bewag) AG; Dipl.-Ing. F. Hölters ist an leitender Stelle in der Planungsabteilung für Stromrichteranlagen der AEG, Berlin, tätig.

1) By-pass-Ventil = Nebenweg-Ventil.

Verringerung von Rückzündungen und ist mit einer erheblichen Komplikation für Hilfsbetriebe und Steuerung der Gefäße verbunden.

Stromrichterventile und Zubehör

Zur Klärung der Spannungsfestigkeit wurden in den letzten Jahren in einem schwedischen Kraftwerk Versuche durchgeführt, die Spannungsbeanspruchungen, entsprechend 175 kV Leerlaufspannung, gestatten. Die Prüfung wurde mehrere Monate lang mit Gleichspannungen bis zu 150 kV bei Last durchgeführt. In der Praxis können diese Ventile ohne Reihenschaltung für etwa 125 kV Brücken-Nennspannung eingesetzt werden.

Nach einem schwedischen Vorschlag wird als Gefäßspannung die Nenngleichspannung einer Brücke bei Last angesehen: Sie ist 13% niedriger als die Leerlauf-Gleichspannung; die größte Sperrspannung beträgt dann das 1,2-fache der Nennspannung, oder einschließlich Überspringen der Sperrspannung das 1,4- bis 1,5-fache der Nennspannung. Von anderer Seite wird empfohlen, hierfür den Ausdruck „Brückenspannung“ zu wählen, oder die ideale Leerlauf-Gleichspannung einer Brücke als Nennspannung zu definieren, oder aber die maximale Anodenspannung der Gefäße für die Bewertung zugrunde zu legen.

Zur Erhöhung der Strombelastbarkeit werden in Schweden und in der Sowjetunion verschiedene Wege beschritten: Die Kanalübertragung arbeitet mit vier Parallelanoden je Gefäß für insgesamt 800 A Gleichstrom, die Übertragung Stalingrad—Donbas mit nur einer stromstarken Anode je Gefäß für 900 A Gleichstrom. Hier sind noch weitere Erkenntnisse zu erwarten. Es wird vorgeschlagen, bei sehr großen Leistungen Einzelgefäße großer Stromstärke an Stelle der Parallelschaltung der Anoden anzustreben.

Hinsichtlich der Prüfschaltungen wird die Dreiphasen-Kurzschlußschaltung für die Gefäßprüfung im allgemeinen als ausgezeichnet angesehen. Nach Ansicht der Sowjetunion ist dagegen diese Prüfschaltung nicht befriedigend, weil sie keine Auskunft über das Verhalten im Wechselrichterbetrieb gibt. In der Sowjetunion sind Versuche mit dreiphasiger Brückenschaltung im Kurzschluß und mit äquivalenten Schaltungen, die den Strom und die Spannung der wirklichen Schaltung wiedergeben, durchgeführt worden. Es hat sich gezeigt, daß die geprüften Gefäße der äquivalenten Schaltung mit Sicherheit in der Übertragungsanlage einwandfrei arbeiten.

Steuerung, Regelung, Schutz

Nach schwedischen Angaben haben sich die Steuer- und Regeleinrichtungen der Gotlandübertragung bewährt, und diese werden auch für die Kanalübertragung beibehalten. Es sind dies eine Konstantstrom-Regelung auf der Gleichrichterseite (im Störfall auch auf der Wechselrichterseite) und eine Löschwinkelsteuerung auf der Wechselrichterseite. Eines Tages wird man bei diesen Einrichtungen zu Transistoren übergehen, und auch in Großbritannien hat man mit dieser Entwicklung bereits begonnen und entsprechende Schaltungen für die Freigabe und Sperrung der by-pass-Ventile und der Brücken, die Löschwinkelsteuerung und die Gittersteuerung untersucht.

Netzmodell

Die Grundschwingungsströme der Stromrichter sind praktisch unabhängig von der Größe der Transformator- und Netzreaktanzen und nur dem Gleichstrom proportional. Ferner ist nach schwedischen Untersuchungen auch die Phasenlage dieser Grundschwingungsströme auf der Ventilseite der Stromrichtertransformatoren, bezogen auf die Grundschwingung der ventilseitigen Wechselspannung, ebenfalls unabhängig von den Reaktanzen und wird nur von dem Zündwinkel des Gleichrichters oder dem Löschwinkel des Wechselrichters bestimmt. Man kann daher eine Gleichstromübertragung in einem Wechselstrom-Netzmodell darstellen, wenn man die Stromrichter durch Stromquellen ersetzt, die auf der Ventilseite der Stromrichtertransformatoren

liegen und einen (dem Gleichstrom proportionalen) sinusförmigen Wechselstrom entsprechender Phasenlage führen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß bei einer Übertragungsanlage eine Station (im Normalfall die Gleichrichterseite) auf konstanten Strom geregelt wird, während die andere Seite die Höhe der Gleichspannung bestimmt.

Diese Methode gestattet die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Netz und Gleichstromübertragung in einem normalen Wechselstrom-Netzmodell, insbesondere die Ermittlung der zu einer Wirkleistung zugehörigen Blindleistung auf der Gleichrichter- und Wechselrichterseite. Gewisse Nachteile werden von anderer Seite bei Untersuchungen des dynamischen Verhaltens gesehen, die ziemlich mühsam und zeitraubend sind und häufige Wiederholungen erfordern. Hierfür werden Digitalrechner als zweckmäßiger erachtet. Nach Ansicht der Sowjetunion, wo ähnliche Arbeiten mit gleichem Ergebnis durchgeführt wurden, eignen sich für derartige Untersuchungen besser elektrodynamische Modelle.

Auch in Italien ist beabsichtigt, ein Netzmodell für eine Gleichstromübertragung zu bauen. Desgleichen plant Großbritannien einen Simulator für die Berechnung von Gleichstromübertragungen.

Leitungen

Die Isolation von Freileitungen wird nach schwedischen Untersuchungen praktisch durch die Betriebsspannung bestimmt. Hierfür sind die Kriechwege entscheidend. Schaltüberspannungen treten im Gegensatz zu Wechselstrom kaum oder nur mit niedrigen Werten und kurzer Dauer auf. Atmosphärische Überspannungen sind wegen des hohen Spannungspegels der Übertragung meist bedeutungslos. Zahlreiche Versuche wurden mit verschiedenen Isolator-typen im Laboratorium und unter natürlichen Bedingungen bei Einwirkung von Regen, Nebel und Verschmutzung durchgeführt. Weitere Langzeitversuche mit Wechselspannung und Gleichspannung laufen zur Zeit noch in Schweden. Hierfür sind leistungsstarke Gleichspannungsquellen mit gespeicherten Ladungen von 0,12 C und 80 mA zulässigem Dauer-gleichstrom erforderlich. Aus den Versuchsergebnissen läßt sich ein Umrechnungsfaktor für das Verhalten bei Wechselspannung und Gleichspannung ermitteln.

Praktisch kann ein Isolator mit einer Gleichspannung gegen Erde beansprucht werden, die dem Werte der zulässigen effektiven Wechselspannung gegen Erde entspricht. Der Umrechnungsfaktor gestattet, die Wahl der Isolation bei Gleichspannung in einem gegebenen Gebiet auf die Wahl der Wechselspannungs-isolation zu beziehen, für die entsprechende Betriebserfahrungen vorliegen.

Je nach Verschmutzungsgrad der Atmosphäre werden Kriechwege von 2 cm/kV bis zu den überraschend hohen Werten von 5 bis 7 cm/kV, bezogen auf Gleichspannung gegen Erde, genannt (Gotland-Übertragung: 1,64 cm/kV; Moskau 2 cm/kV; Stalingrad—Donbas 2,2 cm/kV einschließlich 10% Sicherheit). Von anderer Seite wurden Werte von 4 bis 5 cm/kV bzw. je nach Verschmutzung von 0,7 bis 0,9 cm/kV bis zu 1,9 cm/kV angegeben. Bei einem Kriechweg von 2,2 cm/kV ist auch bei schwerem Nebel ein störungsfreier Betrieb möglich. Nach acht Jahren sind infolge von Verschmutzungen Lichtbögen über mehrere Isolatoren aufgetreten. Bei einem Kriechweg von 1,1 cm/kV ist es gelegentlich zu Überschlagen bei schwerem Nebel gekommen. Auch in der Sowjetunion sind eingehende Untersuchungen über die Isolation von Freileitungen und ihre konstruktive Ausführung durchgeführt worden.

Im übrigen wird dem Überslag bei Gleichstrom wegen des schnellen Eingriffs der Gittersteuerung nicht so große Bedeutung beigemessen, weil der Fehlerstrom begrenzt wird und Betriebsunterbrechungen meist vermieden werden können.

Umfangreiche Koronamessungen sind in Schweden seit einigen Jahren in vollem Gange, wobei Prüfleitungen mit Leiterseilen für Wechselspannung und Gleichspannung (einpole Anordnung beider Polaritäten und zweipole

Anordnungen) untersucht wurden. Bei gleichem Maximalwert der Feldstärke sind bei einpoliger Anordnung nach bisherigen Ergebnissen die Koronaverluste bei negativer Polarität dieselben wie bei Wechselstrom und bei positiver Polarität sogar erheblich niedriger. Bei zweipoliger Anordnung sind die Verluste größer als die Summe der einpoligen. Gegenüber einer Drehstrom-Dreileiteranordnung ist zu erwarten, daß sich etwa gleiche Gesamtverluste bei gleicher maximaler Feldstärke ergeben. Die Rundfunkstörungen durch die Koronaeffekte sind bei Gleichstrom wesentlich geringer als bei Wechselstrom.

Auch in der Sowjetunion sind zahlreiche Messungen zum Bestimmen der Koronaverluste an einer Versuchsstrecke mit Gleichspannungen bis zu ± 400 kV durchgeführt worden. Bei gutem Wetter sind nach diesen Untersuchungen bei gleicher maximaler Feldstärke bei Gleichspannung (zweipolig) die Verluste keinesfalls kleiner, sondern sogar etwas größer als bei Drehstrom. Bei schlechtem Wetter jedoch steigen die Verluste bei Gleichstrom weniger an als bei Drehstrom, wie auch aus den schwedischen Messungen hervorgeht, so daß die jährlichen Verluste bei Gleichstrom etwa 1,5- bis 2-mal kleiner sein können als bei Drehstrom, bzw. bei gleichen Verlusten die maximale Leiterfeldstärke bei Gleichstrom um 10 % gegenüber Drehstrom erhöht werden kann.

Seekabel sind für die Gleichstromübertragung sehr wichtig. Hier sind noch einige Probleme zu lösen. Diese sind teils mechanischer, teils elektrischer Art. Seekabel können heute aus mechanischen Gründen noch nicht für große Tiefen gebaut werden. Nach französischen und englischen Angaben lassen sich z. Z. Verlegungstiefen bis zu etwa 300 bis 400 m bei 300 kV Gleichspannung und 1200 bis 1400 A als Einleiterkabel mit einem Durchmesser von etwa 12 bis 13 cm verwirklichen. Das einfache Papiermassekabel ist hierbei gegenüber dem Olkabel und dem Gaskabel als beste Lösung anzusehen. Die zulässigen maximalen Feldstärken liegen bei etwa 30 bis 40 kV/mm, und Feldstärken von 40 bis 50 kV/mm sollten nicht überschritten werden. Kunststoffkabel können zur Zeit nur bei Gleichspannungen bis zu etwa 100 kV angewendet werden. Hier treten bisher noch ungeklärte Vorgänge im Dielektrikum auf. Um Muffen weitestgehend zu vermeiden, muß man große Kabellängen verlegen. Massekabel können heute in Längen von 30 bis 50 km gefertigt werden.

Die Kabel müssen, wenn man magnetische Rückwirkungen vermeiden will (Kompaßbeeinflussung von Schiffen), möglichst dicht beieinander liegen. Für die Kanalübertragung sollen daher beide Kabel gleichzeitig von einem Kabelschiff verlegt werden. Entsprechende Vorversuche haben die Einhaltung eines Abstandes von etwa 1,5 m ergeben. Von schwedischer Seite wurde die praktische Bedeutung der Kompaß-Beeinflussung geringer bewertet.

Die Umpolung des Kabels bei schneller Energierichtungsumkehr ergibt erhöhte Beanspruchung. Diese muß aber zugelassen werden, wenn man von der vorteilhaften Möglichkeit einer schnellen Energierichtungsumkehr ohne Umschaltung auf der Gleichstromseite Gebrauch machen will.

In Italien wird bei der Cesi in Mailand in den nächsten Monaten mit der Langzeitprüfung von Gleichstromkabeln begonnen.

Bezüglich der Erdung sind in der Sowjetunion in Moskau gute Erfahrungen mit Erdern mit Koksauflage gemacht worden. Nach sechsmonatiger Betriebszeit (Erdung 1,5 km von der Station entfernt, positiver Pol geerdet) mit 150 A konnten keine merklichen Veränderungen festgestellt werden. Zur Zeit werden Messungen in der Umgebung unterirdischer Verbindungen durchgeführt.

Rückwirkungen

Schwedische Untersuchungen ergaben Vorteile der Kondensatoren zur Blindleistungsbereitstellung auf der Wechselrichterseite anstelle umlaufender Blindleistungsgeneratoren. Für die Kanalübertragung werden daher auf beiden Seiten Kondensatoren mit dem Vorteil der geringeren Verluste verwendet. Die Kondensatoren werden

durch vorgeschaltete Drosselspulen zu Saugkreisen ergänzt. Kondensatoren werden auch nach französischer und englischer Ansicht zur Zeit als die wirtschaftlichste Lösung zur Bereitstellung der Blindleistung angesehen, besonders wenn sie zu Saugkreisen erweitert werden. Bei starken Lastschwankungen kann es jedoch vorteilhaft sein, einen Teil der Blindleistung durch umlaufende Blindleistungsgeneratoren zu liefern.

Störungen durch Oberschwingungen werden einmal durch tonfrequente Oberschwingungen verursacht, die sich aus der Pulszahl der Stromrichterschaltung ergeben, und zum anderen durch hochfrequente Oberschwingungen, die durch die Zündung und Löschung der Ventile entstehen.

Eine 12-pulsige Schaltung wird bei Verwendung entsprechender Saugkreise als ausreichend angesehen, zumal höhere Pulszahlen schwierig und aufwendig sind. Bei einer 12-pulsigen Rückwirkung erwartet man keine höheren Beanspruchungen der Generatoren als bei Drehstrom, so daß die Generatoren mit ihrer vollen Nennlast betrieben werden können. Umlaufende Blindleistungsgeneratoren müssen bei 6-pulsiger Beanspruchung mit starken Dämpferwicklungen ausgerüstet werden, entsprechend einer Einphasenbelastbarkeit von 50 %.

Werden die Saugkreise an die Hochspannungs-Sammelschiene angeschlossen, so ist bei gleicher Blindleistungslieferung ein wesentlich geringerer Kondensatoraufwand notwendig als bei Anschluß an die Tertiärwicklung (z. B. 50 MVar statt 75 MVar). Andererseits ist die Filterwirkung der Saugkreise beim Anschluß an die Tertiärwicklung wesentlich günstiger (z. B. statt 50 MVar nur 35 MVar). Wirtschaftliche Untersuchungen haben keine großen Unterschiede der beiden Lösungen ergeben. Die endgültige Entscheidung wird daher noch zurückgestellt, und die Erfahrungen mit der Kanalübertragung sind hierfür sehr wichtig, weil auf britischer Seite die Saugkreise an die Tertiärwicklung und auf französischer Seite an die 225-kV-Sammelschiene angeschlossen sind. Die Filter sind so ausgelegt, daß sie sowohl für den 12-pulsigen Normalbetrieb als auch den 6-pulsigen Betrieb bei Ausfall einer Einheit die entsprechenden Oberschwingungen aufnehmen.

Schwachstromverbindungen können insbesondere bei Freileitungen durch die in der Erde fließenden Oberschwingungsströme beeinflusst werden. Als wirksamste Gegenmaßnahme wird, soweit möglich, die Vermeidung von Näherungen empfohlen.

Hochfrequente Schwingungen werden durch die Entladung und Aufladung der Anlagenkapazitäten beim Zünden und Löschen der Ventile hervorgerufen und im wesentlichen von den Hochspannungsverbindungen zu den Gefäßen und von den Gefäßen selbst abgestrahlt. Auf Grund umfangreicher Messungen in Schweden (Frequenzband 0,15 bis 150 MHz) konnte man bei der Kanalübertragung in der Stromrichterstation Lydd bereits entsprechende Maßnahmen treffen, um die Hochfrequenzstörungen zu bekämpfen. Es bleibt abzuwarten, wie sich der Störpegel mit der Übertragungsleistung ändert. Die bisherige Annahme einer proportionalen Zunahme wurde angezweifelt.

Während bei der Gotland-Übertragung durch den Einbau von Drosselspulen im Anodenkreis der Störpegel ausreichend verringert werden konnte, sind bei der Kanalübertragung in Lydd zusätzliche Maßnahmen, wie Abschirmung des gesamten Gefäßhauses, ferner zusätzliche Hochfrequenzfilter und Dämpfungskreise (unter anderem Ferritkerne), vorgesehen (Stahlskelettbau mit Blechverkleidung, abgeschirmtes Betonfundament; Mehrkosten 40 % gegenüber normaler Ausführung, insgesamt rd. 11 000 m³ mit etwa 100,— DM/m³).

Die Abschirmung der Station Boulogne ist etwas anders ausgeführt, und entsprechende Erfahrungen sind abzuwarten. In der Sowjetunion wurden in Moskau ebenfalls starke Rundfunkstörungen selbst noch in 10 km Entfernung von der Station beobachtet. Diese konnten durch Beschaltung der Brücken mit Kapazitäten verringert werden. Eine Gebäudeabschirmung nach sowjetischer Ansicht erscheint für die Übertragung Stalingrad—Donbas nicht notwendig.

VERBANDSNACHRICHTEN

VDE

Verband Deutscher Elektrotechniker

Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6

Fernruf: 43 31 57; Fernschreiber (Telex) 04—12 871;

Telegramm-Kurzanschrift: Elektrobund;

Postcheckkonto: Frankfurt a. M. 388 68.

Zulassung einer abweichenden Ausführung von festen Anschlußleitungen für Kleintransformatoren nach VDE 0550 Teil 1/3.59, § 16

Auf Grund des in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 314 bekanntgegebenen Verfahrens für das Zulassen von Abweichungen von VDE-Bestimmungen hat die VDE-Kommission „Kleintransformatoren“ dem Antrag mehrerer Hersteller zugestimmt, die Ausführung von festen Anschlußleitungen an Kleintransformatoren — abweichend von VDE 0550 Teil 1/3.59 § 16 d) 3.11. — wie folgt zuzulassen:

Feste Anschlußleitungen müssen einen Mindestquerschnitt von 0,75 mm² haben und mindestens bei Nennleistungen bis 50 VA dem Typ NYZ, über 50 bis 500 VA dem Typ NLH und über 500 VA dem Typ NMH oder gleichwertigen Typen nach VDE 0250 entsprechen. Diese Ausnahme gilt bis zum Inkrafttreten der nächsten Neufassung von VDE 0550 Teil 1, und zwar allgemein, d.h. nicht nur für die Antragsteller.

Für Kleintransformatoren, die bis auf diese Abweichung VDE 0550 entsprechen, wird durch die VDE-Prüfstelle gemäß ihrer Prüfordnung die Berechtigung zum Anbringen des VDE-Zeichens erteilt.

Der Kommissionsvorsitzende

VDE-Vorschriftenstelle

Moch

Weise

Berichtigung des Entwurfes VDE 0560 Teil 8/...60 „Regeln für Motorkondensatoren“

In dem in ETZ-A Bd. 81 (1960) H. 9, S. 346 angekündigten Entwurf VDE 0560 Teil 8/...60 muß es in der Tafel 5, Spalte 12, bei der laufenden Nr. 5 „4 U_n“ statt „1,2 U_n“ heißen.

Der Vorsitzende des VDE-FNE-Gemeinschaftsausschusses „Kondensatoren“
Sträß

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

PERSÖNLICHES

R. Bauer f. — Am 14. Juni 1960 verschied unerwartet an seinem Urlaubsort Oberingenieur Dipl.-Ing. Rudolf Bauer, 1908 in Erfurt geboren, studierte er in München Elektrotechnik, wo er 1931 die Diplom-Hauptprüfung mit Auszeichnung bestand.

Zunächst in der Elektrizitätswirtschaft tätig, verschaffte sich Bauer einen guten Einblick in das Zähler- und Meßwesen sowie den Elektrizitätswerksbetrieb und trat dann 1934 in das Laboratorium für Meßwandler der Siemens & Halske AG in Berlin ein, dessen Leitung ihm 1941 übertragen wurde und um dessen Wiederaufbau er sich nach dem Kriege sehr verdient gemacht hat. Durch die Übernahme des Referates für Meßwandler in Karlsruhe wurde 1957 seine Wirkungsmöglichkeit wesentlich verbreitert und auf wichtige Sonderaufgaben erweitert.

Die hervorragenden Kenntnisse Bauers auf dem Meßwandlergebiet, das er durch wertvolle Neuentwicklungen bereichert hat, fanden ihren Niederschlag in seinem Buch über Meßwandler. Als Mitglied in den VDE-Kommissionen für Meßwandler, für Höchstspannungserzeugung und für Meßverfahren sowie als Obmann des FNE-Arbeitsausschusses für Meßwandler und Mitarbeiter im Arbeitsausschuß für Starkstromkondensatoren hat er durch sein klares Urteil und seine große Erfahrung Wesentliches bei der Gestaltung dieser wichtigen Arbeitsgebiete geleistet.

Die Elektrotechnik verliert in Bauer viel zu früh einen ausgezeichneten Ingenieur und Wissenschaftler, der sich durch seine gewinnende und frohsinnige Art und seine stete Bereitschaft zur Hilfe und zum Ausgleichen großer Wertschätzung erfreute und dessen Andenken alle, die mit ihm zu tun hatten, für immer bewahren werden.

H.-E. Linckh

H. von Cron. — Dipl.-Ing. Hans von Cron vollendete am 12. Januar 1960 sein 65. Lebensjahr. Er hat an der Technischen Hochschule Prag studiert und ist seit über 30 Jahren bei den Siemens-Schuckertwerken tätig. Als enger Mitarbeiter von Dr. Estorff kannte er die Bedeutung des Fremdschichtüberschlages in Hochspannungsanlagen, und auf diesem Gebiet hat er in den vergangenen 20 Jahren mit großem Erfolg gearbeitet. Die Ergebnisse seiner Versuche über den Mechanismus des Fremdschichtüberschlages sowie über die Schlußfolgerungen, die daraus für die Prüfung und Gestaltung der Isolatoren zu ziehen waren, hat er in dieser Zeitschrift veröffentlicht. Die Aufgabe, ein allgemein gültiges Prüfverfahren zu schaffen, durch das eine objektive Beurteilung der Isolatoren unter den schwierigen Betriebsbedingungen möglich wird, war ihm zur Lebensaufgabe geworden. Durch unermüdete geistige Durchdringung der Probleme und danach immer wieder neu angestellte Versuche sowie durch eine tätige Mitgliedschaft in den entsprechenden VDE- und CIGRE-Kommissionen hat er diese Aufgabe außerordentlich gefördert.

H. von Cron ist persönlich im Kreise seiner deutschen und ausländischen Fachkollegen sehr geschätzt. Wenn er auch jetzt von den Pflichten des regelmäßigen Versuchsfeld-Betriebes entbunden ist, werden ihn diese Fragen weiterhin beschäftigen, und er wird auf Grund seiner Erfahrung noch wichtige Beiträge zur Lösung der anstehenden Probleme leisten können.

H. Läßle

BÜCHER

DK 621.3 : 061.2(43)(083.133 VDE

VDE-Vorschriften. Maschinen, Transformatoren, Umformer, Installationsmaterial, Schalt- und Hochspannungsgeräte, Verbrauchsgüter. Bd. 3, Gruppen 5 bis 7. Nach dem Stande am 1. April 1960. 27. Aufl. Mit 1470 S., zahlr. B. und Taf., Format 15 cm × 21,5 cm. VDE-Verlag GmbH, Berlin 1960. Preis Ganzln. 30,— DM.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker läßt mit dem vorliegenden Werk der im vorigen Jahre erschienenen 26. Auflage des Bandes 3 der VDE-Vorschriften nun die 27. Auflage folgen. Sie enthält die gleichen Gruppen der VDE-Bestimmungen, die bisher in Band 3 des VDE-Vorschriftenwerkes zusammengefaßt waren. Die bei den einzelnen Bestimmungen inzwischen eingetretenen Veränderungen sind berücksichtigt. Darüber hinaus ist der Band durch verschiedene Neuaufnahmen erweitert worden. In erster Linie handelt es sich dabei um die neuen Vorschriften für Leuchten (VDE 0710). Diese liegen in vier Teilen vor, die neben allgemeinen Vorschriften besondere Vorschriften enthalten für Handleuchten und Hohlraumleuchten, Lichtketten sowie Leuchten, die unter erschwerten Bedingungen betrieben werden. Die Vorschriften für Leuchten sind ohne Zweifel der Praxis von besonderem Wert und werden mit dazu beitragen, daß die Sicherheit der von ihr erfaßten Geräte weiter erhöht wird.

Ferner sei auf die neuen Vorschriften über Zündtransformatoren in Gas- und Ölfeuerungsanlagen (VDE 0550 Teil 6) aufmerksam gemacht. Diese Anlagen finden zunehmende Anwendung. Das einwandfreie Arbeiten der an ihnen gebräuchlichen automatischen Brenner ist bedingt durch die Zündrichtung. Diese ist für den gefahrlosen Betrieb der Anlage wesentlich und in ihrer Wirkungsweise abhängig von dem Zündtransformator.

Die Fragen der schmiegsamen Elektrowärmegegeräte sowie die Anforderungen, die an sie unter dem Gesichtspunkt ausreichender Betriebssicherheit gestellt werden müssen, haben in der verfloßenen Zeit weite Kreise der Fachwelt beschäftigt und zu umfangreichen Erörterungen geführt. Das Ergebnis dieser Verhandlungen liegt in den Vorschriften für probeweise verwendbare schmiegsame Elektrowärmegegeräte (VDE 0720) nunmehr vor. Diese Vorschriften werden einerseits für den Hersteller solcher Geräte von Wert sein. Zum anderen ermöglichen sie es dem Benutzer, einwandfreie Geräte zu erkennen, da sie nunmehr probeweise mit dem VDE-Zeichen versehen werden können.

Schließlich sei erwähnt, daß die bisher in Band 3 enthaltenen VDE-Arbeiten allgemeinen Inhalts ergänzt worden sind durch VDE 0052. Hierin wird die einheitliche Regelung für den Anschluß von Geräten an das Netz behandelt.

Die Neuauflage des Bandes 3 wird wie die früheren, denen sie in Form und Ausstattung angepaßt ist, den interessierten Kreisen eine dem heutigen Stand der Technik angepaßte wesentliche Arbeitsunterlage sein.

H. Kropf

DK 621.314.634(022.3)

Selengleichrichter. Von G. Mierdel und J. Krocze. Mit 476 S., zahlr. B. u. Taf., Format 17,5 cm × 24,5 cm. VEB-Verlag Technik, Berlin 1959. Preis Lederln 35,— DM.

Der Trockengleichrichter hat während der letzten Jahrzehnte zunehmend an Bedeutung gewonnen. Ein Buch nur über „Selengleichrichter“ würde allerdings nur einen kleineren Kreis von Interessenten finden. Glücklicherweise enthält der Inhalt des Buches sehr viel mehr, als der einschränkend gewählte Titel verspricht.

Die physikalischen Grundlagen der Gleichrichtertheorie werden aus didaktischen Gründen weitgehend an Hand der Mustersub-

stanzen Germanium und Silizium dargestellt. Es folgt eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Selengleichrichtern mit einer Fülle von Hinweisen, welche Wege zur Verbesserung der Eigenschaften eingeschlagen worden sind. Das Kapitel 3 bringt kurz den mechanischen Aufbau der einzelnen Elemente zu einer Gleichrichtereinheit sowie die für die Wärmeabfuhr wesentlichen Gesichtspunkte. Die Kapitel 4 bis 7, die das Kernstück des Buches ausmachen, sind den Gleichrichterstromkreisen gewidmet. Hier werden in recht anschaulicher Weise alle die schaltungstechnisch nicht ganz einfachen Fragen behandelt, die sich durch das Zusammenwirken des Gleichrichters (mit seiner nichtlinearen Charakteristik) und den übrigen an sich bekannten Bauelementen der Starkstromtechnik ergeben. Die Verfasser gehen dabei induktiv von dem noch übersichtlichen Einphasenbetrieb zu den mehrphasigen Systemen über. Die Stromfunktionen sowie Leistungsverhältnisse am Transformator, an den Regeldrosseln und an der Last werden in klarer Form und ausführlich durchgerechnet; viele Zahlenbeispiele vertiefen das Verständnis. Das Kapitel über vormagnetisierte Eisendrosseln (Transduktoren) sei besonders erwähnt, weil hier zumindest die Grundlagen eines sonst recht stiefmütterlich behandelten Stoffes bearbeitet werden. Das Buch schließt mit einer Reihe von Anwendungsbeispielen für kleinere und mittlere Leistungen, die vom Selengleichrichter noch wirtschaftlich bewältigt werden können.

Vielleicht darf der Referent einige Wünsche äußern, die in einer künftigen Auflage berücksichtigt werden könnten. Es sollte deutlicher zwischen einem Shockleyschen pn-Übergang innerhalb eines Einkristalles und einem Kontakt zweier verschiedener p- und n-leitender Halbleitersubstanzen, an dem die Träger beliebig gut rekombinieren („Doppelrandschicht“), unterschieden werden; gerade die für pn-Übergänge so charakteristischen Erscheinungen, wie Diffusionslänge und Trägerinjektion, lassen sich ja beim Selengleichrichter nicht recht nachweisen. Im Kapitel 2 blieb die für gute Durchlaßwerte so entscheidende sperrfreie Kontaktierung an der Grundplatte (durch Nickel- bzw. Wismutselektid Zwischenschicht) unerwähnt. Auch ein „steuerbarer“ Selengleichrichter konnte noch nicht verwirklicht werden; dies ist erst durch die pnpn-Vierschichtelemente aus Germanium sowie Silizium möglich geworden. In das Kapitel 3 würde der Referent die Wärmeübergangszahlen für Fremd- und Eigenbelüftung aufnehmen und ein entsprechendes Berechnungsbeispiel bringen. Auch die unterschiedlichen Eigenschaften von Dynamoblech, nickel- und siliziumhaltigen Eisensorten sollte man bei der Berechnung von Transduktoren berücksichtigen.

Von diesen Wünschen abgesehen, stellt das Buch einen wertvollen Leitfaden für die Konstruktion und Berechnung von Trockengleichrichter-Anlagen dar. In dieser Hinsicht schließt es zweifellos eine Lücke im Fachschrifttum und kann dem berechnenden sowie anwendenden Ingenieur nur empfohlen werden, weil diese Gesichtspunkte der Anlagentechnik keineswegs auf Selenzellen beschränkt sind, sondern genauso für die modernen Germanium- und Siliziumelemente gelten.

Arnulf Hoffmann

DK 681.14.001.57

Elektronische Analogrechner. Wirkungsweise und Anwendung. Von D. Ernst. Mit 315 S., zahlr. B., Format 16 cm × 24 cm. Verlag R. Oldenbourg, München 1960. Preis Ganzln. 38,— DM.

Das Buch will mit Wirkungsweise und Anwendung elektronischer Analogrechner vertraut machen, wobei der Schwerpunkt auf der Programmierung der Aufgaben liegt. Die Einleitung schildert die geschichtliche Entwicklung der analogen und digitalen Rechenmethoden und gibt deren besondere Charakteristiken an. Der Abschnitt über Aufbau und Wirkungsweise elektronischer Analogrechner ist der Aufgabe des Buches entsprechend kurz gehalten. Er behandelt den Rechenverstärker in seinen Schaltungen als Summator, Integrator, Differentiator, kombinierten Operationen, Laufzeiten und die nichtlinearen Rechenoperationen der Multiplikation und Funktionsbildung. Die Programmierung des Rechners nach der mathematisch oder durch ein Blockschaltbild formulierten Rechenaufgabe und die dazu notwendige Behandlung der Amplituden- und Zeitmaßstäbe wird ausführlich dargestellt. Sechs der Rechenpraxis entnommene Beispiele werden bis in die Einzelheiten behandelt und ergeben dadurch einen genauen Einblick in die Programmierungstechnik. Oft benötigte besondere Schaltungen zum Erzeugen von Störfunktionen oder besonderer physikalischer Zusammenhänge sind zusammengestellt. Den Problemen bei der Anschaffung und dem Betrieb eines Analogrechners ist ein besonderes Kapitel gewidmet. Bilder und die Angabe der wesentlichsten Kenndaten machen den Leser mit zahlreichen Typen käuflicher Analogrechner bekannt. Das umfangreiche Schrifttumsverzeichnis ist sehr brauchbar.

Abschluß des Heftes: 1. September 1960

Schriftleitung: Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6, Fernruf 43 31 57; Fernschreiber (Telex) 04-12 871.

Hauptschriftleiter: Dr.-Ing. P. Jacottet (für den redaktionellen Teil verantwortlich).

Schriftleiter: Dipl.-Ing. H. Lübbars, Dipl.-Ing. F. Meske und Dipl.-Ing. K. Rangs.

Zuschriften für die Schriftleitung nicht an eine persönliche Anschrift, sondern nur an: Schriftleitung der ETZ, Frankfurt a. M., Osthafenplatz 6.

Das Buch hat stellenweise Mängel, besonders im Abschnitt über die Wirkungsweise der Rechenelemente. Wer die Division durch Invertierung der Multiplikation, einen 'time-division'- oder Koinzidenzmultipplikator z. B. nicht kennt, wird beim Lesen der entsprechenden Absätze nur wenig klüger werden. Zur gründlichen Unterrichtung über die Technik der Rechenelemente sind deshalb andere Quellen besser geeignet. Die Art der Umrechnung der Problemgleichung in die Maschinengleichung und daraus die Bestimmung der Koeffizienten der Rechenschaltung ist unnötig kompliziert, ihre Eintragung in die Schaltungen ist mißverständlich. An einigen Stellen sind Irrtümer unterlaufen, oder man hätte günstigere Schaltungen angeben können, z. B. bei der zweiten Aufgabe, die mit 6 statt 11 Rechenelementen lösbar ist. Das Buch bietet eine Fülle wertvollen Stoffes, erfordert aber einen kritischen Leser.

E. Kettel

DK 621.38=2

Fundamentals of Electronics. An introduction to modern electronics. Von E. N. Lurch. Mit 645 S., zahlr. B. u. Taf., Format 15 cm × 24 cm. Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York, und Chapman & Hall Ltd., London 1960. Preis Ganzln. 8,25 \$.

Das Buch gibt eine klare Einführung in das Gebiet der Elektronik, wobei im Vordergrund der Darstellung die Elektronenröhren und Transistoren sowie deren Anwendungen stehen. Es wendet sich an diejenigen Leser, die noch nicht mit diesem Gebiet vertraut sind, aber gern einen Überblick über seinen neuesten Stand gewinnen möchten, ohne dazu über Sonderkenntnisse aus dem Gebiet der Physik und Mathematik zu verfügen. Daher werden nur wenige Formeln gebracht, zu deren Verständnis die Kenntnis von Algebra und Geometrie genügen. Mit zahlreichen, instruktiven Zeichnungen werden die beschriebenen Vorgänge anschaulich erklärt.

Zu Anfang des Buches werden Aufbau der Materie und Stromfluß in Festkörpern und im Vakuum beschrieben. In den anschließenden Abschnitten über Bauelemente mit zwei und drei Elektroden werden Röhren und Halbleiter gegenübergestellt. Diese Art der Darstellung ist besonders zu begrüßen mit Rücksicht auf das gemeinsame Anwendungsgebiet von Röhren und Transistoren bei Verstärker- und Schaltaufgaben.

In einigen weiteren Abschnitten wird der Leser mit den wichtigsten passiven Schaltelementen, wie Widerständen, Spulen, Transformatoren, Kondensatoren, ferner mit der in der Nachrichtentechnik viel benutzten Einheit „Dezibel“ und mit der Schaltungstheorie vertraut gemacht. Auf die verschiedenen Anwendungen von Röhren und Transistoren in Verstärkerschaltungen, als Oszillatoren für sinusförmige und nicht sinusförmige Schwingungen und als Modulatoren wird eingegangen. Der letzte Abschnitt gibt einen Überblick über die Betriebsweise und einige Anwendungsmöglichkeiten von Oszillographenröhren.

Am Schluß eines jeden Abschnittes befinden sich Fragen und Aufgaben, durch die der Techniker oder Ingenieur-Schüler einige Übung gewinnen soll, das Gelesene anzuwenden.

L. Brück

BUCHINGÄNGE

Technik der Magnetspeicher. Mit 630 S., 325 B., Format 16 cm × 23,5 cm. Hrsg. F. Winkel. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1960. Preis Ganzln. 72,— DM.

Lexikon der Hochfrequenz-, Nachrichten- und Elektrotechnik. Bd. 3. Mit 876 S., zahlr. B. und Taf., Format 11,5 cm × 16,5 cm. Hrsg. C. Rint. Verlag Technik, Berlin, und Porta Verlag KG, München 1959. Preis Kunstldr. 28,75 DM.

Lexikon der Hochfrequenz-, Nachrichten- und Elektrotechnik. Bd. 4. Mit 852 S., zahlr. B. und Taf., Format 11,5 cm × 16,5 cm. Hrsg. C. Rint. Verlag Technik, Berlin, und Porta Verlag KG, München 1959. Preis Kunstldr. 28,75 DM.

Introduction to modern network synthesis. Von M. E. van Valkenburg. Mit 510 S., zahlr. B. und Taf., Format 15 cm × 23,5 cm. Verlag John Wiley & Sons, Inc., New York und London 1960. Preis Ganzln. 11,75 \$.

Folgende Aufsätze erschienen in der ETZ-Ausgabe B vom 5. September 1960
Heft 18

D. Woll: Numerische Steuerung für Koordinaten-Bohrwerke.

L. Menzel u. W. Courtin: Elektromechanische und elektrohydraulische Nachformverfahren für Vollumfrä.

R. Eschner: Programmgeber für Werkzeugmaschinen.

H. Hübner: Schaltungen mit Kaltkathodenröhren.

E. Ernst: Der Werkzeugmaschinenbau als Kunde der Elektroindustrie.

Schluß des Textteiles

Verlag und Anzeigenverwaltung: VDE-Verlag GmbH, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, Fernruf 34 01 41, Fernschreiber (Telex) 01-84 083.

Anzeigenleitung: Kurt Totzauer.

Bezugspreis (halbjährlich zuzügl. Zustellgebühr) 22,— DM, für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 14,— DM;

Ausgabe A und B zusammen 30,— DM,

für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 21,— DM.

Einzelpreis dieses Heftes 2,— DM.

Druck: Deutsche Zentraldruckerei AG, Berlin SW 61, Dessauer Straße 6/7.